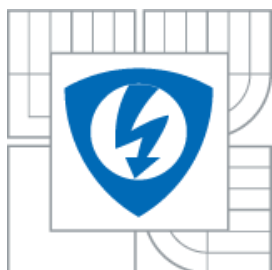




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ ZDROJ S VYSOKOU ÚČINNOSTÍ

HIGH EFFICIENCY LABORATORY POWER SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

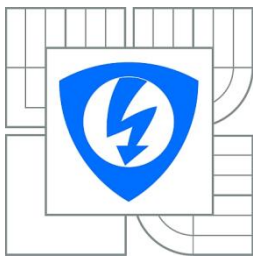
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LENKA ZELINOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ PETRŽELA, PH.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Studentka: Bc. Lenka Zelinová

ID: 72762

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní zdroj s vysokou účinností

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

MM1E: Seznamte se s problematikou impulzních a lineárních regulátorů napětí. Navrhněte blokové schéma laboratorního zdroje, který využívá účinnosti impulzního předregulátoru a výstupních vlastností lineárního regulátoru.

MM2E: Navrhněte komplexní zapojení laboratorního zdroje s regulací napětí a proudu, využívajícího vysokou účinnost spínaného předregulátoru a lineárního regulátoru. Sestavte dokumentaci pro realizaci zdroje (výstupní napětí 5 až 30 V, výstupní proud 0 až 10 A, napájení - střídavé napětí do 30 VAC).

MMSE: Realizujte funkční vzorek zdroje. Proved'te jeho komplexní měření a zhodno'tte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

[2] Switchmode power supply reference manual. Denver: On Semiconductor, 2000.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce uvádí čtenáře do problematiky napájecích zdrojů v elektrotechnice. Popisuje jejich obecné vlastnosti a pro uvedené typy zdrojů uvádí jejich popis a charakteristiky. Na základě těchto poznatků je práce dále zaměřena na výběr vhodných konkrétních prvků pro laboratorní zdroj, který má dosáhnout požadovaných parametrů. Dopočítány jsou také hodnoty dalších specifických součástí. Celkové schéma zdroje je po částech zakomponováno do dokumentu tak, aby zobrazená část tematicky odpovídala dané podkapitole. Podle provedeného návrhu je laboratorní zdroj realizován a jsou odzkoušeny jeho parametry. Ty jsou uvedeny a zhodnoceny v poslední části práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

napájecí zdroj, laboratorní zdroj, regulátor napětí, regulátor proudu, impulzní zdroj, lineární zdroj, zdroj s vysokou účinností, schéma laboratorního zdroje, návrh laboratorního zdroje

ABSTRACT

The project shows the problems of power supply in electrical engineering. It describes the general parameters of these types of supplies and presents their characteristics. Based on these findings, it is also focused on the selection of specific elements of the laboratory supply, to reach the given parameters. It contains the recalculations of the parameters of other additional components. The overall scheme of the supply is divided into several blocks, thematically corresponded to subchapters. According to the accomplished concept the laboratory supply is realized and its parameters had been tested. Projects results are assessed at the end.

KEYWORDS

power supply, laboratory power supply, voltage regulator, switch-mode power supply, current regulator, linear power supply, high efficiency power supply, scheme of laboratory power supply, design of laboratory supply

ZELINOVÁ, L. *Laboratorní zdroj s vysokou účinností*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Petržela, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Laboratorní zdroj s vysokou účinností jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Jiřímu Petrželovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

OBSAH.....	VI
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	VIII
SEZNAM TABULEK.....	X
ÚVOD	1
1. NAPÁJECÍ ZDROJE	2
1.1 ROZDĚLENÍ NAPÁJECÍCH ZDROJŮ.....	2
1.2 ČÁSTI LINEÁRNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE.....	3
1.3 ČÁSTI IMPULZNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE	4
1.3.1 LABORATORNÍ ZDROJE	5
1.4 LINEÁRNÍ LABORATORNÍ ZDROJ.....	6
1.5 IMPULZNÍ LABORATORNÍ ZDROJ	6
2. REGULÁTORY	7
2.1 LINEÁRNÍ REGULÁTORY	8
2.1.1 PARALELNÍ LINEÁRNÍ REGULÁTORY	9
2.1.2 SÉRIOVÉ LINEÁRNÍ REGULÁTORY	10
2.2 IMPULZNÍ REGULÁTORY.....	11
2.3 REGULACE	14
3. PŘEHLEDNÉ POROVNÁNÍ ZDROJŮ	14
4. KOMBINOVANÉ ZAPOJENÍ	17
4.1 TOPOLOGIE.....	17
4.2 ÚČINNOST	18
4.3 PODROBNÉ BLOKOVÉ SCHÉMA LABORATORNÍHO ZDROJE	20
5. LABORATORNÍ ZDROJ 30V/10A.....	21
5.1 SÍŤOVÉ OBVODY A TRANSFORMÁTOR	21
5.1.1 NÁVRH TRANSFORMÁTORU	21
5.1.2 PARAMETRY TRANSFORMÁTORU	22
5.1.3 FILTRACE	23
5.1.4 JIŠTĚNÍ	23
5.1.5 SCHÉMA NAPÁJENÍ	23
5.2 USMĚRŇOVAČ.....	23
5.3 ŘÍZENÍ NABÍJENÍ.....	25
5.3.1 SCHÉMA USMĚRŇOVAČE A ŘÍZENÍ NABÍJENÍ	26
5.4 IMPULZNÍ REGULÁTOR	27
5.4.1 POPIS OBVODU.....	27
5.4.2 HODNOTY PRVKŮ	28

5.5	ŘÍZENÍ IMPULZNÍHO REGULÁTORU	30
5.5.1	PRINCIP ŘÍZENÍ	30
5.5.2	SCHÉMA IMPULZNÍHO PŘEDREGULÁTORU	32
5.6	LINEÁRNÍ REGULÁTOR.....	33
5.6.1	PRINCIP PRÁCE OBVODU	33
5.6.2	SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ.....	34
5.6.3	SNÍMÁNÍ PROUDU	35
5.6.4	NAPĚŤOVÝ A PROUDOVÝ REŽIM.....	35
5.6.5	SCHÉMA LINEÁRNÍHO REGULÁTORU S MĚŘICÍMI PŘÍSTROJI	37
5.7	ZOBRAZENÍ PROUDU A NAPĚTÍ.....	38
5.7.1	ZOBRAZENÍ NAPĚTÍ.....	38
5.7.2	ZOBRAZENÍ PROUDU.....	38
5.7.3	NAPÁJENÍ ZOBRAZOVACÍCH PŘÍSTROJŮ	39
5.7.4	SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJENÍ MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ	39
6.	REALIZACE.....	40
6.1	SEZNAM SOUČÁSTEK	40
6.2	NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE	42
6.3	OSAZENÍ PLOŠNÉHO SPOJE	44
6.4	MECHANICKÁ KONSTRUKCE	44
7.	PARAMETRY VYROBENÉHO ZDROJE	46
7.1	ZVLNĚNÍ NAPĚTÍ NA VÝSTUPU.....	46
7.2	VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA.....	48
7.2.1	NAPĚŤOVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE.....	48
7.2.2	PROUDOVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE	49
7.2.3	VLASTNÍ VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA.....	50
7.3	MĚŘENÍ ČASOVÉ STABILITY	51
7.4	MĚŘENÍ TEPLoty ZATÍŽENÉHO ZDROJE.....	52
7.5	ÚČINNOST ZDROJE	54
7.6	ZAPÍNÁNÍ A VYPÍNÁNÍ ZDROJE	55
7.7	ZKRAT	57
7.8	DYNAMICKÁ ZMĚNA ZÁTĚŽE.....	58
8.	ZÁVĚR	60
	LITERATURA.....	61
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Principiální schéma napájecího zdroje	2
Obr. 1.2:	Průběh veličin lineárního zdroje	3
Obr. 1.3:	Průběh veličin impulzního zdroje	4
Obr. 2.1:	Schéma paralelního lineárního regulátoru se Zenerovou diodou	9
Obr. 2.2:	Schéma sériového lineárního regulátoru se Zenerovou diodou	10
Obr. 2.3:	Blokové schéma impulzního napájecího regulovatelného zdroje	11
Obr. 2.4:	Základní schéma zvyšujícího regulátoru	12
Obr. 2.5:	Základní schéma snižujícího regulátoru (buck)	13
Obr. 2.6:	Průběhy napětí a proudu na prvcích spínaného obvodu	13
Obr. 4.1:	Rozsah příkonu a výkonu regulátoru napětí	17
Obr. 4.2:	Blokové schéma zapojení laboratorního zdroje	18
Obr. 4.3:	Závislost účinnosti na výstupním napětí	19
Obr. 4.4:	Upřesnění bloků laboratorního zdroje	20
Obr. 5.1:	Zapojení transformátoru a příslušných jistění a filtrací	23
Obr. 5.2:	Zvlněný průběh napětí po usměrnění pro $C_F=60\text{mF}$	24
Obr. 5.3:	Zapojení usměrňovače a řízení nabíjení filtračních kondenzátorů	26
Obr. 5.4:	Zapojení impulzního předregulátoru a zpětné vazby	32
Obr. 5.5:	Zapojení lineárního regulátoru a měření	37
Obr. 5.6:	Napájecí obvody měřicích přístrojů	39
Obr. 6.1:	Horní strana desky plošného spoje	43
Obr. 6.2:	Spodní strana desky plošného spoje	43
Obr. 6.3:	Osazovací plán zdroje	44
Obr. 6.4:	Potisk předního panelu	45
Obr. 7.1:	Zvlnění napětí na filtračních kondenzátorech	46

Obr. 7.2:	Schéma zapojení měření zvlnění.....	46
Obr. 7.3:	Zvlnění napětí na výstupu zdroje.....	47
Obr. 7.4:	Reálné zvlnění napětí na výstupu zdroje při $U_{výst}=30V$	48
Obr. 7.5:	Schéma zapojení měření V-A charakteristiky	48
Obr. 7.6:	Napěťová charakteristika zdroje	49
Obr. 7.7:	Proudová charakteristika zdroje.....	50
Obr. 7.8:	Voltampérová charakteristika zdroje.....	50
Obr. 7.9:	Schéma zapojení měření časové stability zdroje.....	51
Obr. 7.10:	Časová stabilita výstupního napětí zdroje	52
Obr. 7.11:	Časová stabilita výstupního proudu zdroje	52
Obr. 7.12:	Schéma zapojení měření teploty	53
Obr. 7.13:	Graf závislosti teploty na době provozu pro maximální výkon	53
Obr. 7.14:	Účinnost zdroje v závislosti na výstupním proudu	54
Obr. 7.15:	Schéma zapojení měření zapínání a vypínání zdroje.....	55
Obr. 7.16:	Průběhy signálů po zapnutí síťovým vypínačem	56
Obr. 7.17:	Průběhy signálů po zapnutí tlačítkem output.....	56
Obr. 7.18:	Průběhy signálů po vypnutí síťovým vypínačem	56
Obr. 7.19:	Průběhy signálů po vypnutí tlačítkem output	57
Obr. 7.20:	Zkrat výstupu zdroje	58
Obr. 7.21:	Měření dynamického připojení zátěže.....	58
Obr. 7.22:	Dynamické připojení zátěže	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	Dělení zdrojů dle průběhů signálů	3
Tab. 3.1:	Přehledné porovnání zdrojů lineárních a spínaných.....	16
Tab. 4.1:	Účinnost zdroje pro různá výstupní napětí	18
Tab. 6.1:	Seznam součástek.....	42
Tab. 7.1:	Zvlnění napětí na výstupu.....	47
Tab. 7.2:	Napěťová charakteristika zdroje	49
Tab. 7.3:	Proudová charakteristika zdroje.....	49
Tab. 7.4:	Časová stabilita zdroje.....	51
Tab. 7.5:	Měření teploty při maximální zátěži.....	53
Tab. 7.6:	Účinnost zdroje.....	54

ÚVOD

Tento dokument pojednává o problematice regulátorů a zdrojů napětí. Zvláštní pozornost je věnována zdrojům pro laboratorní účely. Práce obsahuje také návrh laboratorního zdroje, dokumentaci jeho realizace a výsledky měření vyrobeného zdroje. Práce je členěna do tří částí.

V první části je přiblížena teorie a rozebrány vlastnosti impulzních a lineárních zdrojů, je uveden přehled nároků na vlastnosti a funkce kvalitního laboratorního zdroje každého z těchto typů a nastíněny jejich teoretické charakteristiky. Tyto dva typy napájecích zdrojů jsou přehledně porovnány v kapitole 4 a toto porovnání může čtenáři usnadnit rozhodnutí při výběru typu zdroje v závislosti na jeho aplikaci. Postupně je teorie, uvedená v dokumentu, konkretizována a její aplikací diplomová práce přechází ke specifickému řešení a k návrhu konkrétního zařízení. Jsou vybrány konkrétní hlavní prvky napájecího laboratorního zdroje, které jsou doplněny dalšími součástkami, nezbytně nutnými ke správné funkci zařízení. Transformátor, usměrňovač, integrovaný obvod ve spínací části, tranzistory v lineárním stupni a měřicí přístroje jsou tedy doplněny dalšími lineárními i nelineárními prvky. Jejich existence a hodnoty jsou určeny jednak podle doporučení výrobce, dále podle nutnosti filtrace, nároků na stabilitu, ochrany zařízení proti vlivům ze sítě i špatnému zacházení a správnou funkci zpětných vazeb.

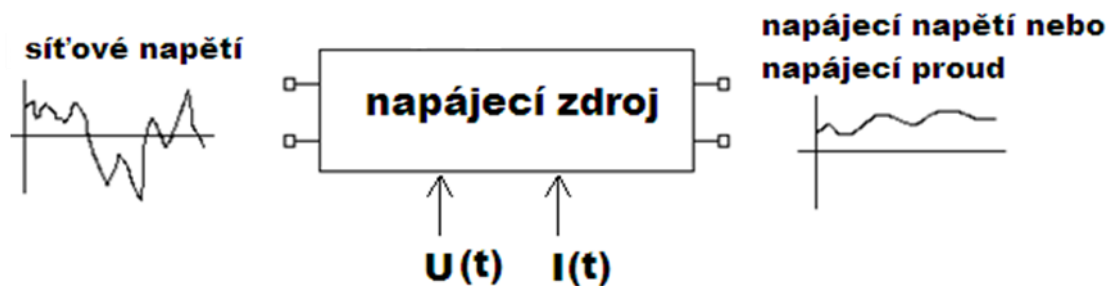
V druhé části práce, v páté kapitole, je uvedeno schéma navrhovaného zdroje. Schéma je rozděleno do několika bloků, které jsou vyobrazeny v tematicky odpovídajících podkapitolách práce. Napájecí zdroj je navrhnut tak, aby splňoval veškeré požadavky na správně fungující laboratorní zdroj, specifikované v teoretické části práce. Navržena je co nejefektivnější kombinace zapojení spínaného a lineárního regulovaného zdroje s ohledem na požadované výstupní parametry. Výsledkem je tedy návrh takového zapojení obou regulátorů za sebou, díky kterému bude mít zdroj vyšší účinnost, tj. menší ztráty, menší zvlnění, dostatečnou rychlost regulace a přitom bude mít relativně malé rozměry.

Poslední část práce, šestá kapitola, obsahuje dokumentaci k realizaci navrženého laboratorního zdroje. Popsány jsou jednotlivé kroky během výroby zařízení a také mechanická konstrukce zdroje. Navržené a vyrobené zařízení je proměřeno a výsledné charakteristiky a vlastnosti jsou uvedeny v sedmé kapitole dokumentu.

V závěru jsou zhodnoceny výsledky diplomové práce.

1. NAPÁJECÍ ZDROJE

Za napájecí zdroj považujeme určité zařízení, které dodává odběrateli elektrickou energii, potřebnou k napájení elektronických zařízení. Je to tedy zařízení, které je schopné dodat elektronickému systému elektrické napětí a proud, potřebný k jeho činnosti. Dodávaná energie musí být v dané toleranci a mít požadovaný průběh.



Obr. 1.1: Principiální schéma napájecího zdroje

1.1 ROZDĚLENÍ NAPÁJECÍCH ZDROJŮ

podle primárního zdroje elektrické energie

- autonomní napájecí zdroje (elektrochemické zdroje, solární články)
- zdroje využívající elektrickou energii jiného primárního zdroje

podle velikosti dodávaného výkonu

- zdroje malých napětí a proudů (pro elektroniku, green power)
- zdroje středně velkých napětí a proudů
- zdroje velkých proudů a vysokých napětí (rozvodny, výkonová elektronika)

podle typu dodávaného výkonu

- zdroje stejnosměrných napětí a proudů
- zdroje střídavých napětí a proudů

podle základního fyzikálního principu činnosti

- elektrochemické (primární a sekundární suché články)
- elektromechanické (generátory, agregáty, dynama, alternátory)
- zdroje, využívající elektrickou rozvodnou síť (elektronické napájecí zdroje)

- ostatní (solární články apod.)

podle povahy vnitřních dějů

- zdroje neregulované (pevně daná výstupní hodnota)
- zdroje regulované (se spojitou či nespojitou regulací)

podle použití

- zdroje laboratorní (dlouhodobě stabilní, přesné, rychlé, s malým zvlněním, izolované)
- zdroje pro lékařství (spolehlivé, stabilní, izolované)
- zdroje pro vojenskou techniku (spolehlivé, ...)
- zdroje pro elektrotechniku a elektroniku (zdroje malých energií pro napájení elektronických zařízení)

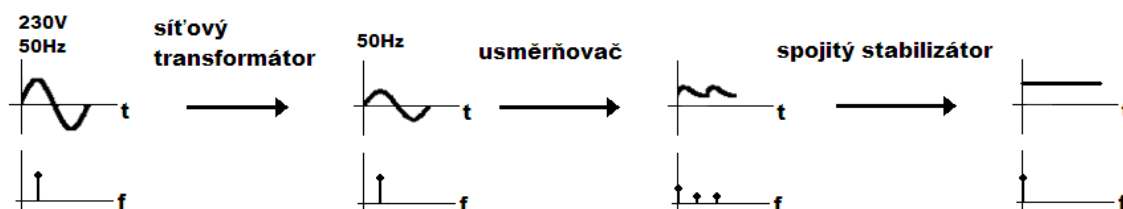
Napětové zdroje jsou dále děleny podle průběhů napětí na vstupu a výstupu [1]:

VSTUP	VÝSTUP	POPIS
střídavý	stejnoseměrný	usměrňovač, měnič, lineární stabilizátor
stejnoseměrný	stejnoseměrný	měníč, lineární stabilizátor
střídavý	střídavý	frekvenční měnič, transformátor
stejnoseměrný	střídavý	střídač

Tab. 1.1: Dělení zdrojů dle průběhů signálů

1.2 ČÁSTI LINEÁRNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

Podkapitola je věnována klasickému lineárnímu napájecímu zdroji, kde je bezpečné napětí získáno z transformátoru. Ten zajišťuje galvanické oddělení síťového napětí od výstupního napětí.



Obr. 1.2: Průběh veličin lineárního zdroje

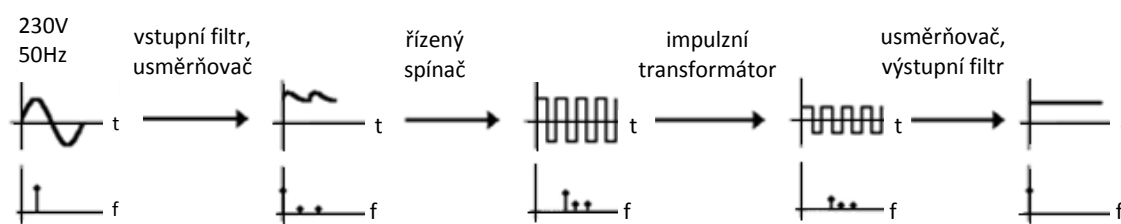
Transformátor je dvojbran nebo vícebran, díky kterému můžeme elektrickou energii přenášet z jednoho obvodu (primárního) do druhého (sekundárního) pomocí vzájemné elektromagnetické indukce. Využívá se pro přeměnu střídavého napětí (např. síťového napětí) na požadované napětí pro připojené zařízení a pro galvanické oddělení obvodů (izolace). Mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru by měla být dobrá elektromagnetická vazba a také malá kapacita.

Usměrňovač slouží k usměrnění střídavého napětí pomocí vhodného zapojení polovodičových diod. Usměrněním střídavého napětí se rozumí jeho přeměna na napětí stejnosměrné.

Stabilizátor je obvod, který je určen ke stabilizaci napětí nebo proudu pro zátěž, neboli k definici jejich stejnosměrné hodnoty s určitou tolerancí. Stabilizované napětí či proud musí být co nejméně závislé na vnějších veličinách (velikost zátěže a její charakter, velikost vstupního napětí, velikost vstupního proudu, teplota, rušení, stárnutí součástek). Spojitý stabilizátor aplikuje pro stabilizaci spojitou regulaci.

1.3 ČÁSTI IMPULZNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

Podkapitola je věnována klasickému impulznímu napájecímu zdroji, kde je bezpečné napětí získáno z impulzního transformátoru. Ten rovněž zajišťuje galvanické oddělení síťového napětí od výstupního napětí.



Obr. 1.3: Průběh veličin impulzního zdroje

Vstupní filtr zajišťuje filtraci složek vyšších harmonických z řízeného spínače. Ve většině případů zajišťuje i filtraci rušivých signálů vstupujících do zdroje.

Usměrňovač slouží k usměrnění střídavého napětí pomocí vhodného zapojení polovodičových diod. Usměrněním střídavého napětí se rozumí jeho přeměna na napětí stejnosměrné. Jeho součástí je i kondenzátor, který vyhlazuje usměrněné napětí. Proti proudovým nárazům při zapnutí zdroje se často používá termistorů s negativní teplotní charakteristikou. Předpokládá se, že při zapnutí je termistor studený a má velký odpor, který po zapnutí klesne (zvýší se teplota). Další možností je použít řízený usměrňovač (tyristory) nebo nabíjení filtračních kondenzátorů pomocí rezistorů.

Řízený spínač je spínací zařízení, které na základě vyhodnocení aktuální situace v systému sepne či rozezne daný obvod. Většina impulzních zdrojů pracuje s konstantním kmitočtem a proměnlivou střídou.

Impulzní transformátor je v tomto případě transformátor příslušného výkonu, pracující na frekvenci řízeného spínače. Magnetický obvod využívá vlastností magneticky měkkých materiálů (ferit, nanokrystalická struktura). Konstrukčně se často využívá vzduchového chlazení.

Usměrňovač a filtr v poslední části zdroje – Typ usměrňovače, požadovaný výstupní proud a velikost filtrační kapacity, případně vyhlazovací indukčnosti ve filtru mají největší vliv na velikost zvlnění výstupního napětí. Ideálně by mělo být výstupní napětí bez zvlnění. Praxe vede na kompromisní řešení, kdy se připouští určité zvlnění výstupního napětí.

Paralelně řazený kondenzátor má z hlediska filtrace pro nulový kmitočet nekonečně velký odpor, a tudíž nemá na stejnosměrnou složku žádný vliv. Pro střídavou složku se kondenzátor ve filtru LC nebo RC chová jako proměnlivá reaktance, která potlačuje střídavou složku.

Indukčnost má z hlediska filtrace pro nulový kmitočet nulový odpor, a při sériovém zapojení nemá na stejnosměrnou složku žádný vliv.

Rezistor má pro stejnosměrnou i střídavou složku stejnou reálnou hodnotu impedance. V návrzích je nutné počítat s vnitřním odporem usměrňovače a filtru.

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad [\Omega] \quad (2)$$

$$X_R = R \quad [\Omega] \quad (3)$$

Z uvedených vztahů je patrné, že X_L je přímo úměrná kmitočtu, X_C je nepřímo úměrné kmitočtu a R je na kmitočtu nezávislé.

Jednoduše lze pak realizovat filtry se strmostí 20 nebo 40 dB na dekádu.

V systémech, kde je požadován velký proudový odběr, je většinou vnitřní odpor velmi nízký. Před filtrační kondenzátor proto zapojujeme nárazovou tlumivkou, a to v sérii s usměrňovačem.

1.3.1 LABORATORNÍ ZDROJE

Laboratorní zdroj je bezpečný zdroj napětí a proudu, používaný především pro měření v laboratořích. Jako napájení využívá elektrickou rozvodnou síť, případně její náhradu.

Je to zdroj nastavitelný na požadované hodnoty výstupních veličin, a to v rozsahu, který uvádí výrobce.

Laboratorní zdroje jsou zařízení, která dodávají především stejnosměrný výkon a splňují určité podmínky:

- dlouhodobá stabilita
- přesnost

- rychlost ustálení
- zvlnění
- šum
- nastavitelnost
- bezpečnost obsluhy

U zdroje uváděného v této práci předpokládáme výstupní napětí v rozsahu 5 až 30V a výstupní proud v rozsahu 0 až 10A.

1.4 LINEÁRNÍ LABORATORNÍ ZDROJ

Výstupní hodnoty jsou řízeny výkonovými prvky obvodu, tedy tranzistory. Ty pracují v lineární oblasti. V obvodu zastávají funkci variabilních rezistorů, které v děliči určují poměr vstupního a výstupního výkonu zdroje. Vzniká tak konstantní výstupní napětí, ale zbývající výkon nepřenese na výstup se ztrácí v podobě tepla. Tyto ztráty jsou výrazné a zdroj je neefektivní.

- síťový transformátor pracuje při frekvenci 50 Hz
- cena roste s výkonem
- má menší zvlnění
- je rychlý
- je přesný
- je dlouhodobě stabilní
- má malou účinnost η
- obvykle má velké rozměry a hmotnost (transformátor úměrný velikosti výkonu, nutnost chlazení lineárního regulátoru)

1.5 IMPULZNÍ LABORATORNÍ ZDROJ

Z rozvodné sítě přichází napětí 230V/50Hz. Toto napětí je filtrováno, následně usměrněno dvoucestným usměrňovačem (diodovým můstkem) a vyhlazeno paralelně připojeným vyhlazovacím kondenzátorem. Širokopásmový filtr na vstupu zabraňuje pronikání rušivých signálů ze zdroje do sítě. Usměrněné napětí na výstupu usměrňovače dosahuje hodnoty téměř $230 \cdot \sqrt{2}$. Toto napětí je dále zpracováváno střídačem, pracujícím podle výkonu na konstantním kmitočtu 30 až 100 kHz, na obdélníkové napětí, jehož střední hodnota je úměrná střídě spínání spínačů.

Elektronické spínače jsou řízeny ze smyčky zpětné vazby tak, aby výstupní napětí případně proud byl konstantní.

Napětí ze střídače je přivedeno na primární vinutí středofrekvenčního impulzního transformátoru s feritovým jádrem a transformováno na potřebnou velikost. Výstupní napětí je usměrněno (například Schottkyho diodami), vyhlazeno (výstupním filtrem) a

vyvedeno na výstupní svorky. O stabilitu výstupního napětí se stará zpětná vazba, která je z výstupu zavedena do obvodu, který řídí spínání střídače zdroje.

- transformátor pracuje na frekvenci cca 1000x vyšší než 50 Hz
- průřez jádra a množství mědi je řádově menší
- zdroj má podstatně menší hmotnost a rozměry
- může být zdrojem rušivých signálů
- cena se méně mění s výkonem
- má větší účinnost η
- je dlouhodobě stabilní
- je přesný
- má větší zvlnění
- regulace je pomalejší

V pulzních zdrojích závisí hodnota příkonu nejen na výstupním výkonu, vlastnostech spínacích a filtračních prvků a užití obvodové topologii, ale také na způsobu řízení spínaných prvků (například pulzně šířková modulace –PWM- s proměnnou střídou).

Spektrální hustota spínaného napětí má obvykle energii koncentrovanou na relativně vysokých kmitočtech. Projevy přechodů během spínání, jako například zákmity pozorovatelné na výstupu, mohou být filtrovány pomocí příslušných LC filtrů.

Hlavní výhodou spínaného zdroje je vysoká účinnost, menší rozměry a malá hmotnost. Díky pulznímu zpracování napětí při použití moderních součástek mají nízké teplotní ztráty a tím často odpadá problém s chlazením.

Nevýhodou je větší složitost a generace vyšších frekvencí. Díky spolehlivosti a parametrům moderních součástek se složitost nejvíce projeví v ceně vývoje. Vysoké frekvence však musí být s ohledem na EMI odstraněny například filtrem typu dolní propust. Zvlnění výstupní napětí je nutné zejména při použití zdrojů pro napájení elektroniky filtrovat.

Velmi levné spínané zdroje bez výše uvedených opatření mohou přenášet spínáním vzniklé rušivé signály zpět k síťovému zdroji, kde mohou ovlivnit další zařízení, připojená do sítě.

2. REGULÁTORY

Napěťový regulátor je zařízení, které v elektrickém obvodu dokáže automaticky udržovat konstantní úroveň výstupního napětí. K tomu se využívá elektromechanických nebo pasivních či aktivních elektronických komponent. Podle typu vybraného zařízení pak můžeme regulovat jedno nebo více napětí střídavých či stejnosměrných [5].

Kromě principu funkce pasivních přepínačů je funkce regulačních zařízení založena na porovnávání aktuálního výstupního napětí vůči nějaké vnitřní, pevně dané, referenční hodnotě napětí. Jakékoliv rozdíly mezi těmito dvěma napětími jsou zesilovány a používány jako regulační element pro snižování odchylky. To zařizuje záporná zpětná vazba, zpětnovazební smyčka. Zesílení zpětné vazby vede ke zvýšení přesnosti regulace, ale snižuje stabilitu. Je nutné se zaměřit na zamezení kmitání nebo doznívání při skokových změnách vstupního nebo výstupního napětí. Při návrhu tedy musíme najít kompromis mezi požadovanou rychlostí zdroje a požadavkem na stupeň jeho stability.

Jestliže je výstupní napětí menší, například díky snížení vstupního napětí nebo zvýšení proudu v zátěži, regulační článek zařídí, aby bylo výstupní napětí zvýšeno na správnou hodnotu

- snížením sériového odporu pro sériové lineární regulátory
- zvýšením paralelního odporu pro paralelní lineární regulátory
- zvýšením střídý pro impulzní regulátory (například u typu „buck“ - snižující)
- čerpáním vstupního napětí delší dobu (například u typu „boost“ - zvyšující)

Pokud je výstupní napětí příliš vysoké, regulační prvek zařídí, aby se snížilo na správnou hodnotu

- zvýšením sériového odporu pro sériové lineární regulátory
- snížením paralelního odporu pro paralelní lineární regulátory
- zmenšením střídý pro impulzní regulátory (například u typu „buck“ - snižující)
- čerpáním vstupního napětí kratší dobu (například u typu „boost“ - zvyšující)

Analogicky lze obdobné principy použít i pro regulaci proudu.

2.1 LINEÁRNÍ REGULÁTORY

Lineární napěťový regulátor v elektronice je principiálně založen na aktivním prvku (bipolární plošný tranzistor nebo tranzistor řízený polem), pracujícím ve své lineární oblasti (na rozdíl od spínaných tranzistorů, které pracují na principu zapnuto/vypnuto), nebo na pasivním prvku, jako jsou například rezistory u stabilizátorů se Zenerovou diodou, pracujícím ve své specifické oblasti.

Řídící zařízení je navrženo tak, aby se chovalo jako proměnlivá zátěž, průběžně přizpůsobující se přes dělič napětí tak, aby se na výstupu udržovala požadovaná konstantní hodnota napětí.

Lineární regulátor je poměrně málo účinný ve srovnání s účinností spínaného zdroje. Napětí na regulačním prvku je závislé na požadovaném výstupním napětí. Ztráty způsobené průchodem výstupního proudu (protékajícím přes regulační prvek) je nutné odvést chladicím systémem ve formě tepla.

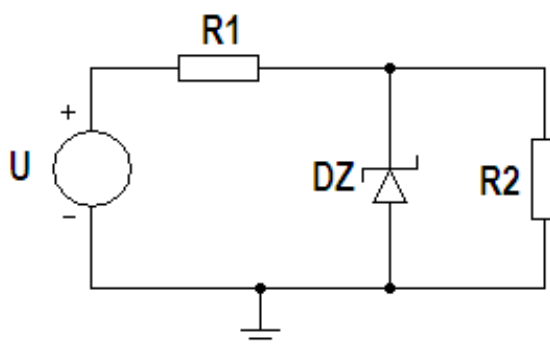
Tranzistor je použit jako horní člen děliče napětí. Zpětnovazební obvod porovnává výstupní napětí s požadovaným napětím, odvozeným z napětí referenčního. Výstup regulátoru napětí ovládá řídicí tranzistor, což udržuje výstupní napětí přiměřeně konstantní.

Výše uvedený způsob je však neefektivní, tranzistor se chová jako rezistor a dochází k velkým tepelným ztrátám. Ve skutečnosti je ztráta výkonu, způsobená zahříváním tranzistoru, rovna součinu proudu, protékajícího tranzistorem, a úbytku napětí na tranzistoru.

Lineární regulátory se vyskytují ve dvou základních formách, a to sériové a paralelní.

2.1.1 PARALELNÍ LINEÁRNÍ REGULÁTORY

Paralelní regulátory napětí mají řazen proměnný odporový člen paralelně k zátěži. Regulátory využívají konstantního sériově řazeného rezistoru mezi zdrojem napětí a výstupem. (tranzistor je připojen „zdola“ na napěťový dělič). Proud protékající tímto regulačním členem je odkloněn od zátěže. Tento způsob regulace je méně efektivní než sériový způsob řazení. Je však jednodušší, někdy se sestává pouze z napěťové referenční diody. Toho je využíváno zejména v obvodech s malým výkonem.



Obr. 2.1: Schéma paralelního lineárního regulátoru se Zenerovou diodou

Na obrázku 2.1 je obvodové schéma napěťového regulátoru se Zenerovou diodou. Dioda na sobě udržuje konstantní napětí, dokud jí bude protékat proud dostatečný k dosažení stabilizačního účinku. Přes odpor R1 teče proud, který se dělí do větve se Zenerovou diodou a do větve se zátěží. Odpor R1 spočítáme pomocí vzorce (4),

$$R_1 = \frac{U - U_Z}{I_Z + I_{R_2}} \quad [\Omega] \quad (4)$$

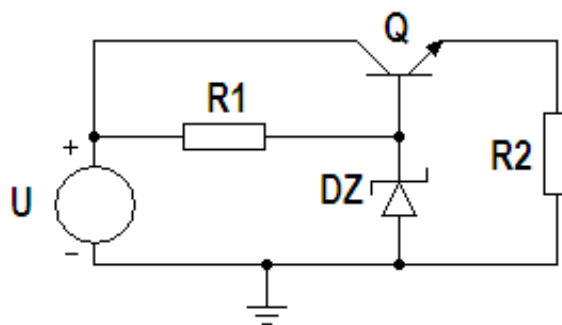
kde U_Z je Zenerovo napětí, I_Z je proud protékající diodou a I_{R_2} je požadovaný proud v zátěži.

Tento regulátor je používán v jednoduchých aplikacích s malým výkonem, kde jsou protékající proudy malé, a kde je zátěž permanentně zapojená k Zenerově diodě. Často se tato zapojení používají jako napěťové reference. Odpojení zátěže totiž způsobí, že proud, původně tekoucí do zátěže, poteče diodou (přičte se k původnímu proudu, protékajícímu Zenerovou diodou). Tento proud však nesmí převýšit maximální povolenou hodnotu proudu diodou. Jejím překročením může dojít ke zvýšenému tepelnému namáhání diody a k jejímu zničení.

Díky sériovému vnitřnímu odporu diody a její tepelné závislosti není regulace tohoto obvodu zcela přesná. Napětí na diodě bude závislé na její teplotě a na jí protékajícím proudu.

2.1.2 SÉRIOVÉ LINEÁRNÍ REGULÁTORY

Sériové regulátory mají mezi napájením a zátěží zařazený proměnný odporový člen (tranzistor je připojen „shora“ k napěťovému děliči). Výkon spotřebovaný regulačním zařízením je roven výstupnímu proudu zdroje, násobenému napěťovým úbytkem na zařízení [1], [2], [5].



Obr. 2.2: Schéma sériového lineárního regulátoru se Zenerovou diodou

Přidáním emitorového sledovacího stupně do regulátoru se Zenerovou diodou vznikne jednoduchý sériový napěťový regulátor a výrazně se zdokonalí regulace obvodu. Proud do zátěže teče z tranzistoru, jehož báze je přímo připojena k Zenerově diodě. Báze tranzistoru je napájena ze stabilizátoru, který tvoří rezistor R1 a Zenerova dioda R_z. Díky zesílení tranzistoru může být výstupní proud ze stabilizátoru podstatně větší než u klasického stabilizátoru se Zenerovou diodou. Toto zapojení je řazeno mezi sériové, neboť regulační element – tranzistor – je v sérii se zátěží. Rezistor R1 určuje proud Zenerovou diodou a současně proud báze tranzistoru. Jeho hodnotu lze dopočítat dle vzorečku (5),

$$R_1 = \frac{U - U_Z}{I_Z + K \cdot I_B} \quad [\Omega], \quad (5)$$

kde U_Z je Zenerovo napětí, I_Z je proud protékající diodou, I_B je proud bází tranzistoru, $K \in < 1,2; 2 >$ (pro zajištění dostatečně malého R1 vůči adekvátnímu proudu bází) a

$$I_B = \frac{I_{R_2}}{h_{FE(\text{MIN})}} \quad [\text{A}], \quad (6)$$

kde I_{R2} je požadovaný proud zátěží a zároveň proud emitoru tranzistoru. Díky velkému zesílení tranzistoru můžeme předpokládat, že proud kolektoru je stejný jako proud emitoru. Dosazované zesílení h_{FEmin} je minimální akceptovatelné zesílení stejnosměrného proudu tranzistorem.

Tento obvod má tedy mnohem lepší regulovatelnost než jednoduchý paralelní regulátor se Zenerovou diodou, neboť báze tranzistoru tvoří velmi malé zatížení na diodě. Tak dochází k minimálnímu kolísání napětí při změně zátěže.

Je však nutné vzít na vědomí, že výstupní napětí bude vždy přibližně o 0,65V menší než na Zenerově diodě (podle použitého tranzistoru – o napětí mezi jeho bází a emitorem), a že je teplotně závislé.

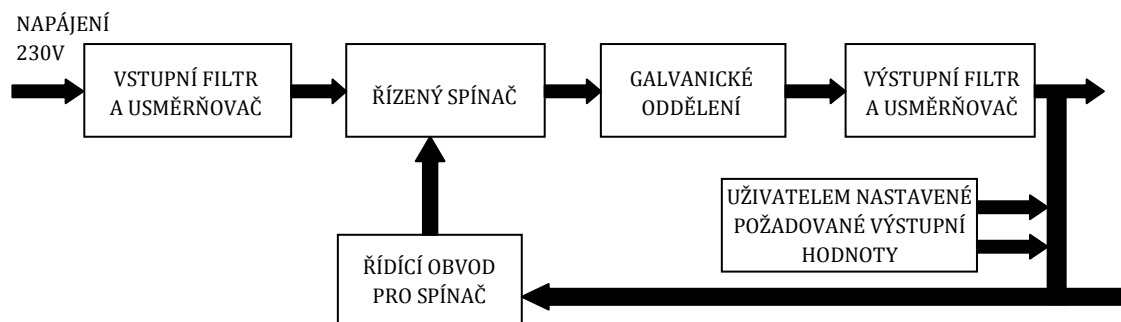
Přestože má tento obvod lepší možnost regulace, pořád je citlivý na kolísání zdrojového napětí a proudu zátěží. Také neumožňuje přizpůsobení či kalibraci. Obě tato negativa mohou být rozřešena vložením záporné zpětné vazby. Tyto obvody pak bývají využívány jako základ pro předregulátory složitějších a pokročilejších obvodů, regulujících napětí.

Všechny lineární regulátory potřebují vstupní napětí o něco větší, než je požadované výstupní napětí. Tento jejich rozdíl je nazýván „drop-out voltage“, volně přeloženo jako ztrátové napětí. V praxi to znamená, že například obyčejný regulátor, jako je integrovaný stabilizátor 7805, má výstupní napětí 5V.

Toto výstupní napětí však dodá pouze tehdy, pokud úroveň vstupního napětí bude minimálně na hodnotě kolem 7V. Jeho ztrátové napětí je tedy minimálně 2V. U stabilizátorů, kde není možné splnit tento požadavek, musí být použito stabilizátorů s malým úbytkem napětí, nazývaných LDOs (low dropout regulators).

2.2 IMPULZNÍ REGULÁTORY

Impulzní neboli spínané napěťové napájecí zdroje (SMPS – Switching-mode Power Supply) jsou elektronické zdroje, které obsahují spínaný regulátor, jenž zajišťuje požadované výstupní napětí. Jsou to v podstatě převodníky, které přeměňují výkon zdroje (například z baterie, z elektrické sítě,...) do zátěže (například PC, mobilní telefon,...). Úkolem většiny regulátorů je produkce výstupního napětí, které má obvykle jinou úroveň než napětí vstupní.

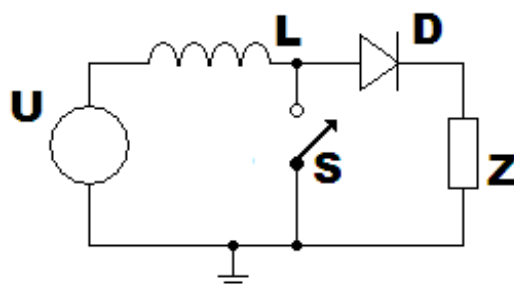


Obr. 2.3: Blokové schéma impulzního napájecího regulovatelného zdroje

Na rozdíl od lineárních regulátorů pracuje tranzistor ve spínaných regulátorech ve spínacím režimu. Regulační obvod způsobí rychlé přepínání mezi otevřeným a zavřeným stavem a zmenšuje tím vodivostní energetické ztráty. Vznikají zde však nové spínací ztráty. Tyto ztráty jsou závislé na pracovní frekvenci. Celkové ztráty jsou ale výrazně menší než u lineárních regulátorů. Regulace napětí je umožněna proměnným poměrem časů, po které je tranzistor sepnutý a rozepnutý. Právě vysoká účinnost těchto regulátorů je hlavní předností spínaných napájecích zdrojů [3],[4].

Spínané regulátory nahrazují lineární tehdy, pokud se klade požadavek na vysokou účinnost, malou velikost, případně menší hmotnost zařízení. Jsou ale složitější a jejich střídavé proudy mohou vyvolat rušení, jestliže nejsou dostatečně potlačeny. Vstupní část regulátoru obsahuje kapacitní filtry, které mohou způsobovat nevhodnou hodnotu účinku ($\cos \varphi$).

Výstupní napětí či proud regulují spínáním proudu do paměťových prvků, jako jsou cívky a kondenzátory, v různých elektrických kompozicích. Ideální spínací prvky (například tranzistory) pracují ve dvoustavovém režimu. V sepnutém stavu mají nulový odpor a v rozepnutém stavu nekonečný odpor. V takovém případě by teoreticky mohly měniče pracovat se 100% účinností (celý vstupní výkon by byl převeden do zátěže a žádná energie by se nepřeváděla na teplo – ztráty) [2].



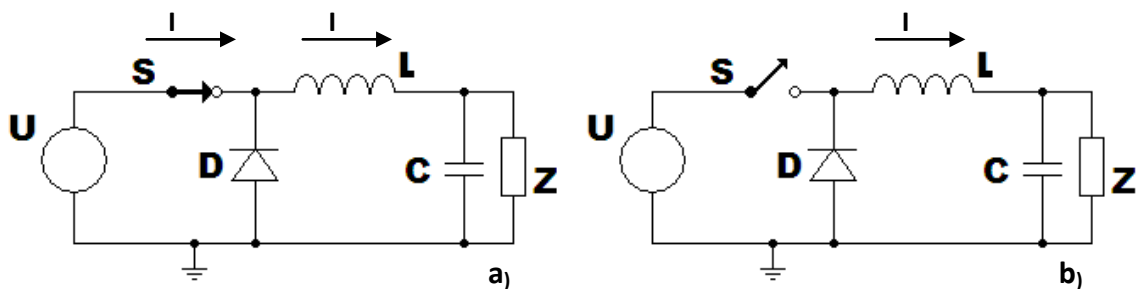
Obr. 2.4: Základní schéma zvyšujícího regulátoru

Pokud jsou stejnosměrný zdroj, cívka a spínač v sérii, špičkové napětí na spínači při vypnutí může dosáhnout velikosti větší, než je velikost napětí ze zdroje. Cívka totiž reaguje na proudové změny indukci vlastního napětí, aby udržela konstantní proud. Toto napětí se přidává ke zdrojovému v době, kdy je spínač rozepnutý a proud vytéká z indukčnosti do zátěže.

Na tomto principu pracují tzv. zvyšující regulátory (Obr. 2.4), činností podobné jako zvyšovací transformátory, zde však pro stejnosměrné signály. Inverzně zvyšující měnič pracuje na stejném principu, avšak výstupní napětí je inverzní (opačné polarity) k napětí vstupnímu.

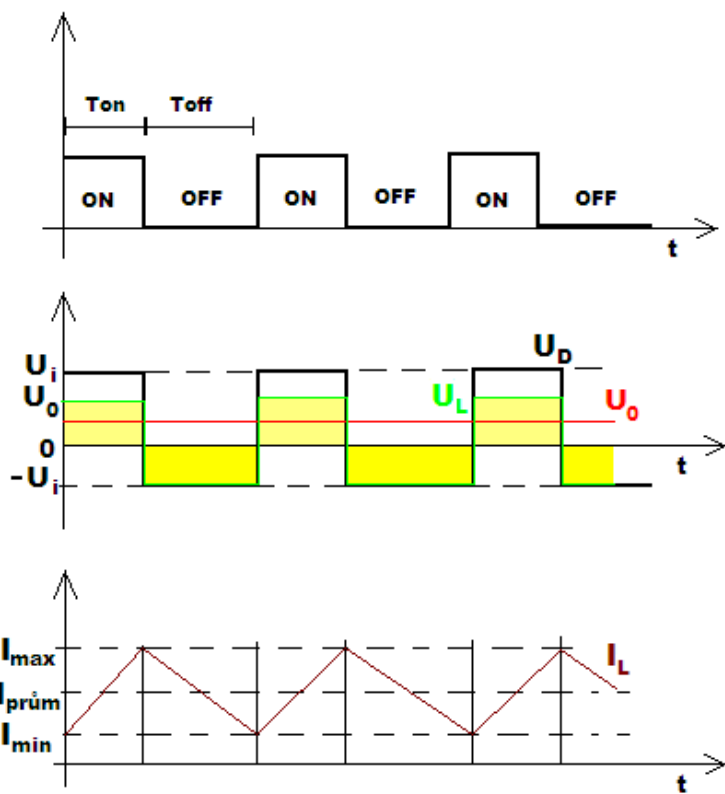
Obvod základního snižujícího regulátoru je složen ze spínače, cívky, diody a výstupního kondenzátoru. Spínáním tranzistoru dochází k nárůstu hodnoty proudu indukčností, až se na výstupu dosáhne příslušného napětí. V cívce je akumulována energie a po rozpojení

spínače se proud z cívky uzavírá přes diodu. Cívka předává získanou energii kondenzátoru, který je paralelně připojen k zátěži [2].



Obr. 2.5: Základní schéma snižujícího regulátoru (buck)

- a) proud cívkou L lineárně roste, dioda D je v závěrném směru
- b) cívka L předává proud do obvodu, proud teče diodou D



Obr. 2.6: Průběhy napětí a proudu na prvcích spínaného obvodu

Výstupní napětí je dáno střídou spínání spínače [8].

2.3 REGULACE

Zpětnovazební obvody sledují stav výstupního napětí a srovnávají ho s napětím, které si uživatel na výstupu potenciometry zvolí (žádaná hodnota). Podle požadavků na zdroj z hlediska bezpečnosti může regulační jednotka také obsahovat izolační vazební člen pro izolaci zpětnovazebních obvodů od výstupního napětí. Ve spínaných zdrojích počítačů, televizí a videorekordérů je proto často používán optický vazební člen.

Některé jednodušší regulátory nemají zpětnovazební obvod. Spoléhají na to, že do transformátoru/cívky bude dodáváno konstantní napětí a předpokládají, že bude výstup správně zatížen.

U složitějších regulátorů s vysokými požadavky na přesnost je nutné počítat s kompenzací parazitní kapacity transformátoru nebo cívky, stejně tak jako s kompenzací magnetické hystereze jádra.

Fázová a kmitočtová charakteristika regulátoru musí zajistit spolehlivou funkci regulace výstupního napětí za všech okolností. K záskokům a ani ke vzniku kmitání nesmí docházet při změnách zátěže v průběhu celého života zařízení.

3. PŘEHLEDNÉ POROVNÁNÍ ZDROJŮ

Důvody pro volbu regulátoru daného typu můžeme shrnout jako [6][7]:

parametr	lineární napájecí zdroj	spínaný napájecí zdroj	stručné obeznámení
velikost hmotnost	Je-li v obvodu transformátor, bude relativně velký a těžký, jelikož pracovní frekvence hlavního (síťového) zdroje je nízká (50 nebo 60 Hz)	čím je pracovní frekvence vyšší, tím bude zdroj menší (obvykle 50kHz až 1MHz)	Velikost a hmotnost transformátoru je úměrná jeho výkonu a snižuje se s požadavkem na vyšší pracovní frekvenci za předpokladu, že hysterezní ztráty mohou být potlačeny. Vyšší pracovní frekvence pak znamená větší výkonnost či menší rozměry.
výstupní napětí	Je-li v obvodu transformátor, lze získat libovolné napětí na výstupu. Pokud ne, získá se nanejvýš vstupní napětí. Je-li zdroj neřízený, výstupní napětí se se zátěží výrazně mění.	K dispozici je jakékoliv výstupní napětí, se změnou zátěže kolísá velmi málo.	Zdroj spínaný se obvykle s větším kolísáním na vstupu vyrovná a nemění úroveň výstupního napětí.

účinnost oteplení ztrátový výkon	Je li regulovaný, „přebytečný“ výkon se mění v teplo a jeho účinnost je kolem 5 až 60%. Je li neřízený a správně navržený, jeho účinnost je až 80%. Ztráty vždy vznikají v transformátoru (v železe a mědi)	Regulace se provádí řízením činitele využití, což umožňuje čerpat pouze tolik výkonu, kolik požaduje zátěž. Ve všech těchto zdrojích jsou vždy tranzistory sepnuté nebo rozepnuté. Typická účinnost je cca 85%.	Tepelné ztráty v součástkách díky jejich nedokonalosti (spínací ztráty tranzistorů a jejich rezistence, ekvivalentní sériový odpor cívek a kondenzátorů, ztráty v jádrech cívek, úbytek napětí na usměrňovači) způsobují snížení účinnosti na 60 až 70%. Optimalizací a kvalitním návrhem lze dosáhnout minimálních ztrát a účinnosti až 90%.
složитost	Neregulované se mohou skládat z usměrňovače, kondenzátoru a případně tlumivky. Nastavitelné jsou regulovány integrovaným obvodem nebo diskretními obvody.	Sestává se z impulzního regulátoru – integrovaného obvodu, výkonových tranzistorů a diod, výkonového tranzistoru a filtračních vstupních a výstupních filtrů. Často používá středofrekvenční tlumivku nebo transformátor.	Jedním transformátorem lze dosáhnout různých hodnot napětí pomocí činitele využití. Jedno z napětí může být vybráno pro napájení zpětné vazby. Ostatní výstupy velmi dobře sledují regulované napětí. Vždy je třeba dobře zvolit vhodné transformátory. Vzhledem k vysoké pracovní frekvenci spínaných zdrojů je důležitý rozptyl indukce a kapacity.
frekvenční interference (rádiové vlny)	Mírné vysokofrekvenční rušení při velkém zatížení může být generováno diodovým usměrňovačem, ale většina typů zdrojů VF rušení neprodukuje. Síťový brum může procházet na výstup.	EMI/RFI vzniká prudkou změnou při sepnutí a rozepnutí. Proto je potřeba EMI filtry a RF stíněním rušení potlačit.	Dlouhé spoje mezi součástkami mohou snižovat účinnost vysokofrekvenčních kapacitních filtrů umístěných na vstupu a výstupu zařízení.
rušení na výstupních svorkách	Neřízené zdroje mohou mít malé zvlnění, překrývající stejnosměrnou složku na dvojnásobné frekvenci (100–120 Hz), což může způsobit slyšitelný síťový brum v audio zařízeních nebo světlé vlnky či pásy v analogových bezpečnostních kamerách.	Hlučnější díky neustálému spínání, nefiltrovaný výstup může způsobit závady v digitálních obvodech.	To může být potlačeno v koncovém stupni kondenzátory a jinými obvody pro odrušení. Hluk, způsobený spínáním, může být zamaskován například zvolením spínací frekvence tak, aby nespadala do určitého rozsahu (například pro audio systém mimo rozsah slyšitelnosti).
rušení na vstupu	Harmonické zkreslení na střídavém vstupu, malé nebo žádné vysokofrekvenční rušení.	Velmi levné spínané zdroje mohou přenášet spínáním vzniklé rušivé signály zpět k síťovému zdroji, kde mohou ovlivnit další zařízení v síti. Nepříznivě působené zdroje také způsobují harmonické rušení.	Tomu lze zabránit, pokud jsou řádně uzemněny a navrženy filtry EMI / RFI a jsou připojeny mezi vstupní svorky a můstkový usměrňovač.

akustický šum	Slabý „šramot“, obvykle neslyšitelný síťový brum jako důsledek otřesů vinutí v transformátoru a nebo magnetostricke ¹ . Vysoká magnetická indukce v transformátorech může ovlivňovat různé magnetické materiály v okolí.	Pro lidské ucho neslyšitelné (hluk pouze pokud mají ventilátor, jsou nezatížené nebo vadné).	Pracovní frekvence nezatíženého spínaného zdroje je někdy v rozsahu slyšitelnosti lidského ucha. Nevhodná konstrukce – umístění reproduktoru v blízkosti transformátoru může způsobit slyšitelné hučení.
účinník (cosφ)	Nízký pro nastavitelné zdroje, jelikož proud je dodáván ze síťového zdroje při vrcholové hodnotě napětí (vrcholky sinusovky)	Nízký až střední, protože jednoduchý zdroj bez PFC dodává špičkový proud při vrcholové hodnotě sinusoidy střídavého proudu	Aktivní či pasivní korekcí lze kompenzovat problém u spínaných zdrojů. Některé instituce pro elektrickou regulaci je dokonce vyžadují, zvláště v západní Evropě.
nebezp. - úraz elektric. proudem	Zdroje s transformátory jsou bezpečně uzemněny. Nebezpečí hrozí, pokud je primární/sekundární izolace poškozena, nebo pokud jsou v rozporu se správným návrhem. V případě, že nemají transformátor, je provoz zdroje nebezpečný. Nebezpečná mohou být i výstupní napětí, proto musí být zdroj velmi dobře izolován.	Galvanické oddělení od sítě je zaručeno impulzním transformátorem. Kde není využita galvanická izolace, hrozí vždy úraz elektrickým proudem. Nebezpečná mohou být i výstupní napětí, proto musí být zdroj velmi dobře izolován.	Vzhledem k předpisům EMI a RFI, řada spínaných zdrojů obsahuje filtry, skládající se z kondenzátorů a cívek, už před usměrňovačem. Tyto filtry musí být vhodně voleny s ohledem na unikající proudy. Pokud tomu tak není, mohou tyto proudy způsobit potíže na zařízeních, citlivých na zbytkový proud.
nebezp. - zničení zařízení	Velice zřídka, pokud nenastane zkrat mezi primárním a sekundárním vinutím nebo se nezničí regulátor vnitřním zkratem.	Produkují velmi vysoká výstupní napětí, a tím mohou zničit vstup regulátoru. Přepětíové ochrany jsou často součástí zdroje. Poškození, případně selhání prvku může způsobit zničení dalších součástí. Škody takto způsobené mohou být vysoké. Zabezpečení proti selhání musí být kvalitně navrženo.	Odrůšení napětí je provedeno kondenzátory, přemostujícími vstup výstup napájecího zdroje. Spojení se zemí způsobí krátkodobou (a potenciálně destruktivní) proudovou špičku.

Tab. 3.1: Přehledné porovnání zdrojů lineárních a spínaných

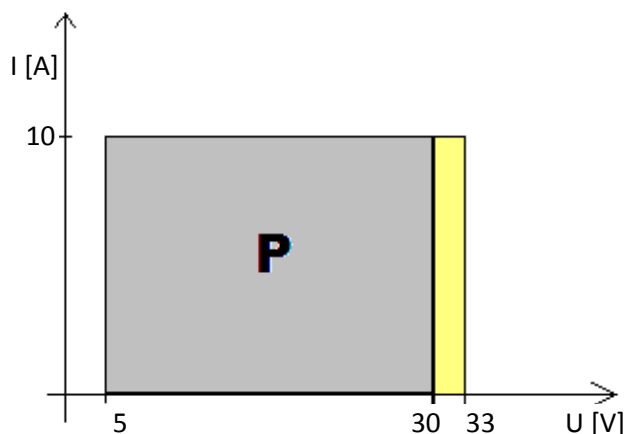
¹ magnetostricke je změna rozměrů materiálu při zmagnetování

4. KOMBINOVANÉ ZAPOJENÍ

Jedná se o takové vnitřní zapojení napájecího zdroje, kde se využije jak velká efektivita spínaného zdroje, tak rychlost a malé zvlnění zdroje lineárního.

4.1 TOPOLOGIE

V návrhu tedy budou oba typy zdrojů zapojené v kaskádě, prvně spínaný a za ním lineární regulátor. Na tranzistoru v lineární části je snaha udržet konstantní malé napětí (cca 1 až 3V), což bude řízeno regulátorem ve zpětné vazbě. Dle požadavků na výstupní veličiny bude obvodově zajištěno správné nastavení impulzního předregulátoru. Teoreticky by se takto mělo dát dosáhnout účinnosti až 90% při maximálním výstupním výkonu zdroje.



Obr. 4.1: Rozsah příkonu a výkonu regulátoru napětí

rozsah příkonu.....celá vybarvená oblast grafu

rozsah výkonu šedá část grafu

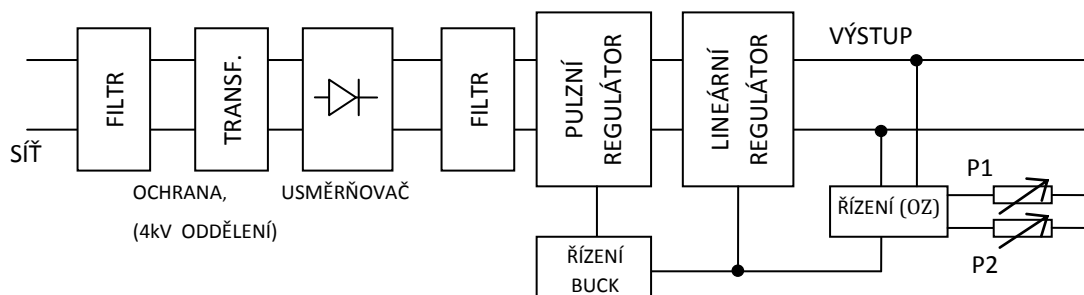
Za vstupním transformátorem a usměrňovačem síťového napětí bude stejnosměrné ustálené napětí s maximální hodnotou 50V, což nám postačí k získání výstupního napětí v rozsahu 5 až 30V při proudu 0 až 10A.

Síťový transformátor bude zároveň plnit funkci ochrany, galvanické oddělení sítě. Ve schématu (Obr. 4.2) bude zapojena pulzní část zdroje typu „buck“ neboli snižující a následné lineární část.

Pulzní část bude ze sekundárního vinutí transformátoru odebírat pouze výkon potřebný k dosažení výstupního napětí a proudu. To je značně efektivní. Za touto spínanou částí bude následovat lineární regulátor, který si na sobě pomocí zpětné vazby bude udržovat konstantní napětí přibližně 2 až 3V. Toto napětí je nutné pro správnou funkci součástek v obvodu lineárního regulátoru, především výkonových tranzistorů.

Napětí by mělo být nejmenší možné, aby byly co nejnižší ztráty. Musí však umožnit dynamiku lineárního obvodu, tj. schopnost reakce na změnu zátěže. Toho bude dosaženo úpravou sledovaného výstupního napětí.

Kombinace spínaného a lineárního regulátoru by měla vytvořit stabilní napájecí zdroj s vysokou účinností a poměrně velkou rychlostí, který bude produkovat ustálené stejnosměrné napětí téměř bez zvlnění.



Obr. 4.2: Blokové schéma zapojení laboratorního zdroje

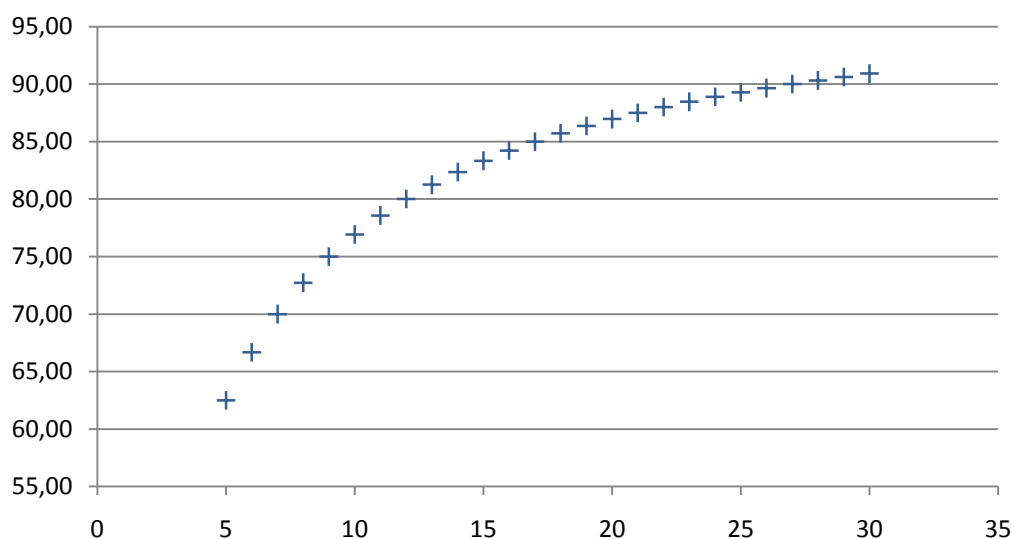
4.2 ÚČINNOST

Maximální předpokládaný příkon bude tedy 330W a maximální výstupní výkon 300W. Teoreticky vychází účinnost tohoto zdroje na 90,9% při maximálním výkonu. Další hodnoty účinnosti uvádí tabulka (Tab. 5.1). Pro názornost je uveden graf závislosti účinnosti na výstupním napětí (Obr. 5.3) při výstupní hodnotě proudu například 1A.

U [V]	P _{vst} [W]	P _{výst} [W]	η [%]
5	8	5	62,50
6	9	6	66,67
7	10	7	70,00
8	11	8	72,73
9	12	9	75,00
10	13	10	76,92
11	14	11	78,57
12	15	12	80,00
13	16	13	81,25
14	17	14	82,35
15	18	15	83,33
16	19	16	84,21
17	20	17	85,00

U [V]	P _{vst} [W]	P _{výst} [W]	η [%]
18	21	18	85,71
19	22	19	86,36
20	23	20	86,96
21	24	21	87,50
22	25	22	88,00
23	26	23	88,46
24	27	24	88,89
25	28	25	89,29
26	29	26	89,66
27	30	27	90,00
28	31	28	90,32
29	32	29	90,63
30	33	30	90,91

Tab. 4.1: Účinnost zdroje pro různá výstupní napětí



Obr. 4.3: Závislost účinnosti na výstupním napětí

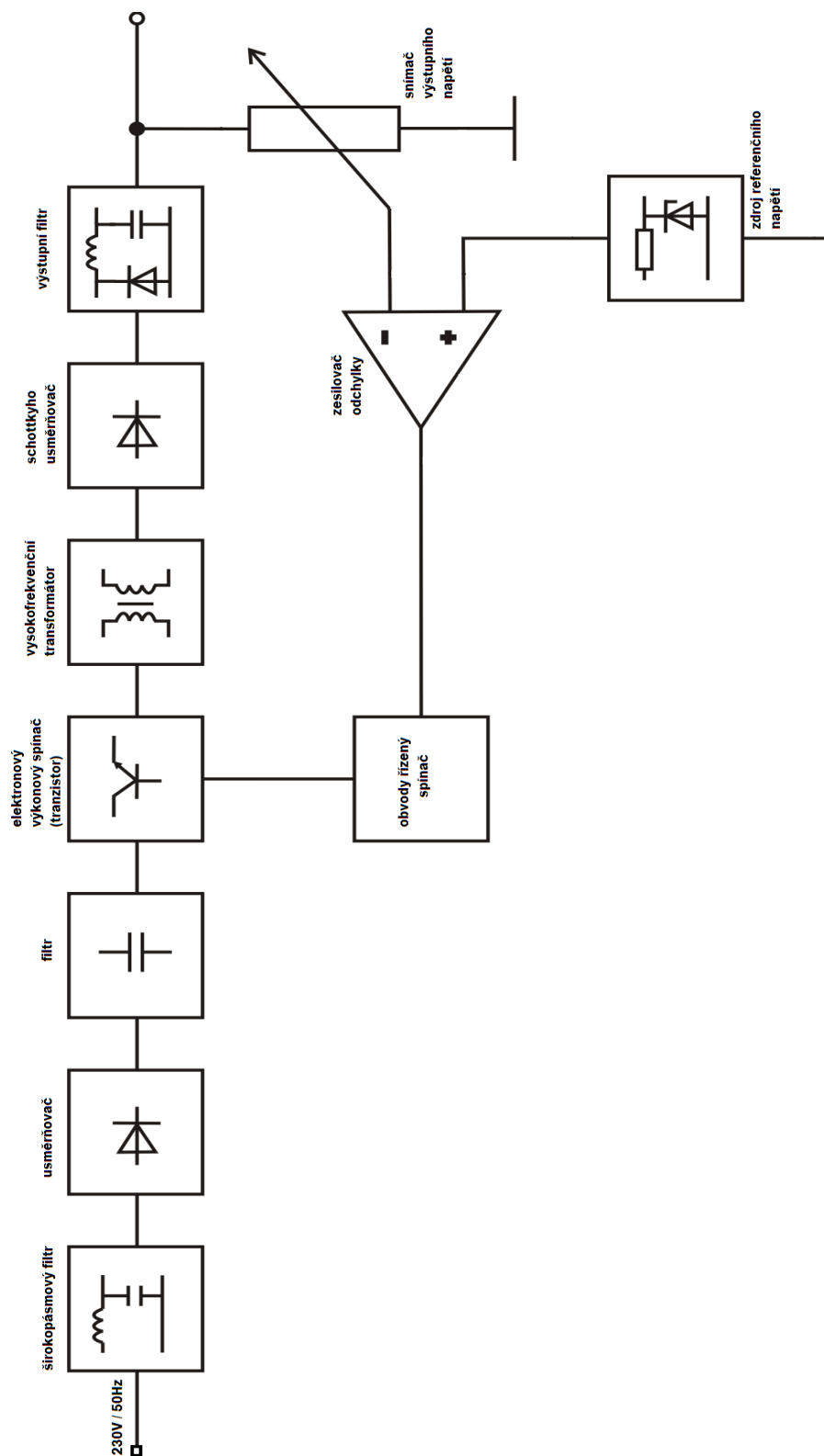
Do předpokladů není započítána účinnost transformátoru a usměrňovače. Uvažován je ideální pulzní regulátor. Úbytek na lineárním stabilizátoru se předpokládá 3V.

Předpokládaná účinnost transformátoru je 88% až 92% a impulzního regulátoru včetně usměrňovače 80% až 90%. V závislosti na výkonu se tedy bude pohybovat celková účinnost zdroje v rozmezí 50% až 80%.

Spínané prvky v obvodu budou s největší pravděpodobností tranzistory typu MOSFET s kanálem N. K řízení tranzistorů ve spínacím regulačním článku bude sloužit integrovaný obvod. Ovládání proudu a napětí bude prováděno v lineární části regulátoru. Zpětná vazba pro řízení impulzního regulátoru bude zajišťovat diferenční napětí na lineárním stabilizátoru.

Zdroj bude potřebovat pomocné stejnosměrné napětí k napájení integrovaných obvodů a měřících přístrojů napětí a proudu. Toto napájecí napětí bude odebíráno ze sekundárních vinutí transformátoru.

4.3 PODROBNÉ BLOKOVÉ SCHÉMA LABORATORNÍHO ZDROJE



Obr. 4.4: Upřesnění bloků laboratorního zdroje

5. LABORATORNÍ ZDROJ 30V/10A

Kapitola je věnována návrhu jednotlivých částí zdroje.

Specifikace požadavků pro návrh zdroje:

- regulace napětí 5 - 30V
- regulace proudu 0 - 10A
- odolnost proti zkratu
- elektronické odpojení výstupního napětí
- zobrazení skutečné hodnoty výstupního napětí
- zobrazení skutečné hodnoty výstupního proudu
- možnost zobrazení žádané hodnoty výstupního napětí
- možnost zobrazení žádané hodnoty výstupního proudu
- napájení z transformátoru, hlavní sekundární napětí 30V

Z těchto požadavků je dáno, že pro dosažení odolnosti vůči zkratu a regulaci proudu od hodnoty 0A musí mít zdroj možnost regulovat výstupní napětí od hodnoty 0V. Prvky, kterými bude operátorem zdroj nastavován, však mohou být nastavitelné až od hodnoty 5V na výstupu, aby bylo dodrženo zadání. Zapojení zdroje vychází z blokového schématu na obrázku 4.2 a obrázku 4.4. Je doplněno o obvod postupného nabíjení filtračních kondenzátorů, které budou mít v tomto případě velkou kapacitu.

5.1 SÍŤOVÉ OBVODY A TRANSFORMÁTOR

Transformátor bude hlavním vinutím zajišťovat napájení spínané a lineární části zdroje. Pomocná vinutí budou napájet digitální měřicí přístroje a obvody nabíjení filtračních kondenzátorů.

Příkon pomocných obvodů činí přibližně 1 W (vinutí U_3) pro digitální měřicí přístroje, jejich napájení bude $\pm 5V$, při odběru 50mA z +5V a 2mA z -5V, a lineární stabilizátor, přes který budou přístroje napájeny a 1W (vinutí U_2) pro napájecí obvody relé, které je použito pro řízení nabíjení filtračních kondenzátorů. Tento příkon je celkem přibližně 2W a nebude dále zahrnut ve výpočtech parametrů transformátoru (je menší než 1%). Pomocná vinutí budou uvažována až pro výpočet zaplnění okna transformátoru.

5.1.1 NÁVRH TRANSFORMÁTORU

Návrh vychází z použití síťového transformátoru se sekundárním vinutím do 30V pro napájení DC/DC převodníku. Protože není specifikováno, zda jde o napětí při plné zátěži či nikoli, je předpokladem, že jde o napětí při plné zátěži a při jmenovitém síťovém napětí 230V. S ohledem na malý rozdíl mezi vstupem a výstupem spínaného DC/DC převodníku při maximálním výstupním napětí musí být zajištěna nízká hodnota celkového vnitřního

odporu transformátoru. Uvažuje-li se potřebné vstupní napětí pro impulzní část zdroje, zvlnění napětí za usměrňovačem na kapacitním filtru, tolerance kolísání síťového napětí, úbytky na vinutí transformátoru a na usměrňovacích diodách, je volen transformátor s mírnou výkonovou rezervou. Tato rezerva bude 25%. Současně tím bude zajištěno jeho menší oteplení, a tím i menší vnitřní odpor jeho vinutí.

Účinnost impulzního převodníku s usměrňovačem je uvažována 89% (η_1), účinnost lineárního stabilizátoru 90% (η_2) při výstupním výkonu 300W, tedy při proudovém odběru 10A a výstupním napětí 30V.

$$P = \frac{P_{výst}}{\eta_1 * \eta_2} * (1 + k) \quad [W], \quad (7)$$

kde k je požadovaná rezerva výkonu transformátoru.

Nutný výkon transformátoru je 375W a se zvolenou rezervou bude požadovaný výkon 468W podle vzorce (7). Tato hodnota je navýšena o ztráty na pomocných obvodech, potřebný výstupní výkon transformátoru je pak 470W. Použit bude transformátor 500VA.

5.1.2 PARAMETRY TRANSFORMÁTORU

Výpočet parametrů transformátoru podle literatury [8]

$$P_{max} = S^2 \quad [W, cm^2], \quad (8)$$

Plocha středního sloupku S podle vztahu (8), vychází 21,7cm². Vybráno bylo tedy jádro EI50 výškou sloupku 45mm. Počet primárních závitů určíme podle (9a).

Počet sekundárních závitů závisí na požadované hodnotě výstupního napětí. Pro jejich výpočet je uveden vzorec (9b). V praxi se výsledný počet závitů primárního vinutí zaokrouhluje na nižší celý počet závitů, sekundárního vinutí pak na vyšší celý počet, často kvůli vnitřnímu odporu až o 5%.

$$N_P = U_{P_{ef}} * \frac{45}{S}, \quad (9a)$$

$$N_n = U_{n_{ef}} * \frac{45}{S}, \quad (9b)$$

Výsledné počty vinutí jsou postupně pro primární vinutí a sekundární vinutí s napětím 30V pro hlavní části zdroje, 10V pro napájení řízení nabíjení filtračních kondenzátorů a 8V pro napájení digitálních měřicích přístrojů:

$$\begin{aligned} N_P &= 477 \text{ závitů,} \\ N_1 &= 65 \text{ závitů,} \\ N_2 &= 23 \text{ závitů,} \\ N_3 &= 18 \text{ závitů} \end{aligned}$$

$$S_n = \frac{I_{n_{ef}}}{J} \quad [mm^2], \quad (10)$$

Pro vysokou účinnost transformátoru bude hodnota J, tedy hodnota proudové hustoty, volena 2,5 A/mm². Zdánlivý výkon transformátoru bude 500VA, tomu odpovídá hodnota primárního odebíraného proudu podle (11) 2,2 A.

$$I_P = \frac{S}{U_P} \quad [\text{A}], \quad (11)$$

Průřez daného vodiče bude počítán podle (10), tedy $S_p=0,88\text{mm}^2$

$$S_1=4,8\text{mm}^2$$

$$S_2=0,04\text{mm}^2$$

$$S_3=0,05\text{mm}^2$$

průměry	$d_p=1,06\text{mm} \rightarrow 1,1\text{mm}$	proudy a napětí	$I_p=1,62\text{A}$	$U_p=230\text{V}$
	$d_1=2,47\text{mm} \rightarrow 2,5\text{mm}$		$I_1=12\text{A}$	$U_1=30\text{V}$
	$d_2=0,23\text{mm} \rightarrow 0,3\text{mm}$		$I_2=100\text{mA}$	$U_2=10\text{V}$
	$d_3=0,25\text{mm} \rightarrow 0,3\text{mm}$		$I_3=120\text{mA}$	$U_3=8\text{V}$

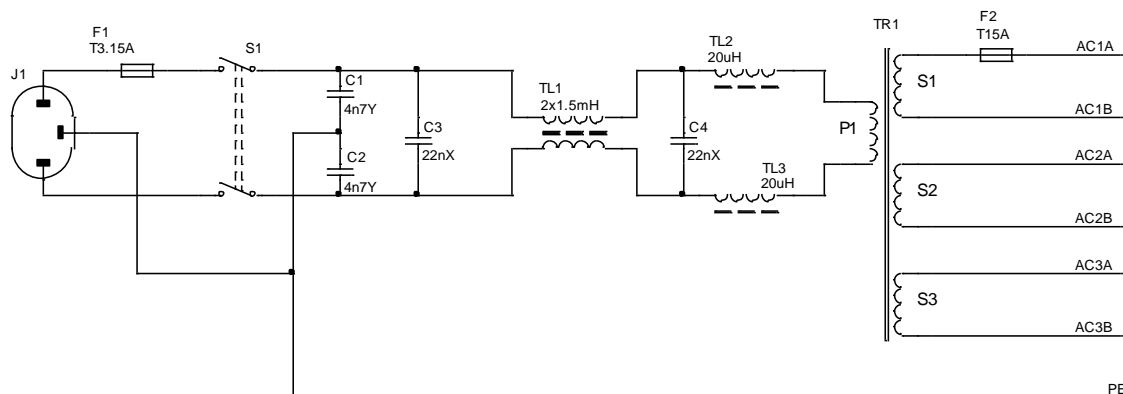
5.1.3 FILTRACE

Před transformátorem je zařazen síťový odrušovací filtr, který obsahuje toroidní tlumivku s proudovou kompenzací pro potlačení symetrického rušení a tlumivky s otevřeným feritovým jádrem pro potlačení asymetrického rušení [9],[10]. Kondenzátory C1, C2 jsou v provedení Y mezi fázovým, nulovým a ochranným vodičem, a C3, C4 v provedení X mezi fázovým a nulovým vodičem. Tento filtr potlačuje rušení vznikající v impulzním předregulátoru, procházející přes transformátor do sítě. Toto zapojení současně umožňuje omezit průnikům rušivého napětí ze sítě do zdroje.

5.1.4 JIŠTĚNÍ

Vstup výkonového transformátoru je jištěn tavnou pojistkou F1 typu T (3,15A)[10]. Výstup je jištěn pojistkou F2 typu T (15A).

5.1.5 SCHÉMA NAPÁJENÍ



Obr. 5.1: Zapojení transformátoru a příslušných jištění a filtrací

5.2 USMĚRŇOVAČ

Pro usměrnění je zapojen do obvodu dvoucestný můstkový usměrňovač. Na tomto usměrňovači vznikají poměrně velké ztráty. K nabíjení kondenzátorů nedochází po celou dobu periody, ale pouze po určitou dobu, kdy napětí na diodách usměrňovače je vyšší než napětí na kondenzátorech. Tato doba je přibližně 20%. Špičková hodnota proudu v době nabíjení kondenzátorů je tedy pětinasobně vyšší než její střední hodnota, tj. 60A. Úbytek

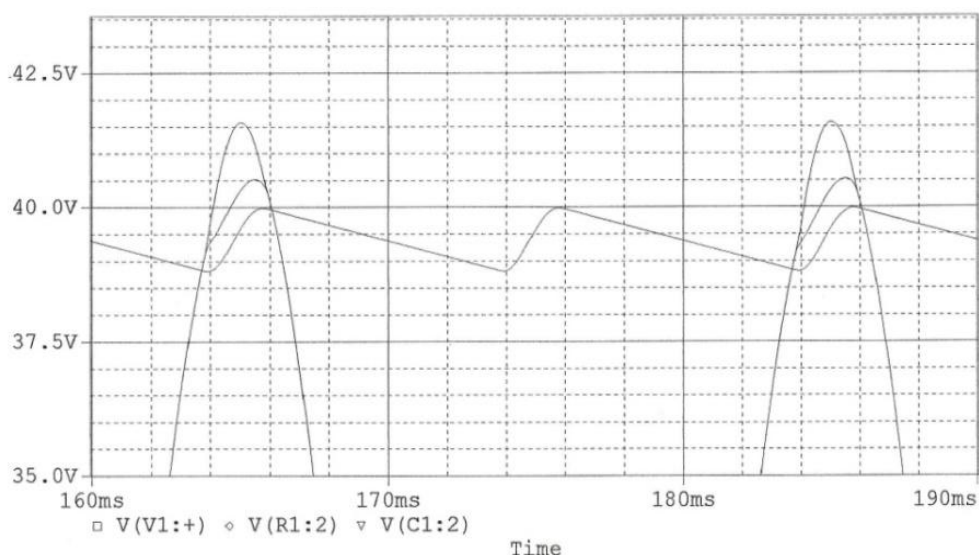
napětí na jedné diodě při tomto špičkovém dosahuje 1V [11]. V každé půlperiodě prochází proud právě dvěma diodami a celkový úbytek je tedy 2V.

Aby byla úroveň napětí pro další zpracování dostatečná, musí být za usměrňovač umístěna dostatečně velká filtrační kapacita. Čím větší tato kapacita bude, tím menší bude zvlnění napětí po usměrnění. Požadavkem je co nejmenší zvlnění, proto bude použita poměrně velká hodnota kondenzátorů. Při přímém připojení filtračních kondenzátorů k usměrňovači dochází k vysokým proudovým nárazům, které se transformují na primární stranu transformátoru, a které by mohly poškodit usměrňovač, snížit životnost filtračních kondenzátorů a zničit ochranu proti přetížení (pojistky F1, F2). Proto je nezbytné nabíjet filtrační kondenzátory přes nabíjecí rezistory.

$$U_{max} = 30 * \sqrt{2} \quad [V] \quad (12)$$

Byl zvolen usměrňovač z řady KBPC50000 na 50A kvůli malému vnitřnímu odporu a vysokým proudům při nabíjení. Opakovatelná špičková hodnota proudu je 90A, což vytváří mírnou rezervu. Sekundární napětí 30V efektivních odpovídá amplitudě 42,43V (12). Po odečtení úbytku napětí na usměrňovači, který činí cca 2V + 0,5V (úbytky na diodách [11] a vnitřní odpor transformátoru 0,02Ω), dosahuje amplituda hodnoty 40V.

Usměrněné napětí dosahuje špičkových hodnot 40V a nejnižší hodnota usměrněného napětí pro vstup impulzního předregulátoru by měla dosahovat hodnoty 38,5V, aby na výstupu bylo napětí minimálně 33V. Maximální přípustné zvlnění je pak 1,5V. Simulací bylo ověřeno, že pro toto zvlnění musí být za usměrňovačem paralelně připojeny vyhlazovací kondenzátory s minimální celkovou hodnotou kapacity 40mF. Z praktických důvodů bude volena kapacita filtračních kondenzátorů 60mF. Výsledek simulace, vykonané programem OrCAD PSpice je zobrazen na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Zvlněný průběh napětí po usměrnění pro $C_F=60\text{mF}$

Ke každé diodě usměrňovacího můstku je přiřazen keramický kondenzátor. Tyto kondenzátory zamezují pronikání vysokofrekvenčního rušení dále do obvodu a omezují vznik záskoků při spínání diod. Za usměrňovačem je zapojena výkonová tlumivka TL4 na feritovém jádře, která s připojeným keramickým kondenzátorem tvoří LC filtr.

Usměrňovací můstek musí být umístěn na chladiči, neboť na něm vznikají tepelné ztráty:

$$P_{ZTR} = I_{STR} * U_D * 2 \quad [\text{W}] \quad (13)$$

Celkové ztráty na usměrňovači jsou tedy 24W.

5.3 ŘÍZENÍ NABÍJENÍ

Řízení je řešeno nabíjením přes nabíjecí rezistory. Je předpokladem, že maximální nabíjecí proud je přibližně stejně velký jako maximální zatěžovací proud z usměrňovače, tedy 12A.

$$R_{NAB} = \frac{U_{MAX}}{I_{MAX}} \quad [\Omega], \quad (14)$$

Nabíjecí rezistor bude mít hodnotu 3,3 Ω (14). Na tomto rezistoru vzniká v průběhu nabíjení kondenzátorů výkonová ztráta do chvíle, než dojde k překlenutí rezistoru kontakty relé. Ta je v okamžiku zapnutí zdroje až 480W a zmenšuje se s narůstajícím napětím na kondenzátorech. Pokud budou kondenzátory nabity a nebude odebírán proud do zátěže, výkonová ztráta na rezistorech bude téměř nulová. Nabíjecí rezistor bude proveden v podobě tří paralelně zapojených výkonových rezistorů s hodnotou 10 Ω (R1, R2, R3).

Řídicí obvod zajistí po nabití kondenzátorů na hodnotu alespoň 85% sepnutí relé vždy až po uplynutí minimální ochranné doby opětovného zapnutí zdroje, to znamená cca po čtyřech až pěti sekundách. Výkon z transformátoru je pak veden přes usměrňovač přímo do filtračních kondenzátorů.

Jako zmíněný řídicí a časovací obvod byl vybrán TL7702 [12], který zaručuje nulování (opožděné sepnutí relé) při každém zapnutí. Jakmile vzroste napětí na vstupu SE (pin 7) nad referenční úroveň ($U_{REF} = 2,5\text{V}$), obvod spustí časovač. Časové zpoždění je závislé na hodnotě externího kondenzátoru C_T , který je zapojen mezi zemí a pinem 3 časovacího obvodu (15). Použitá kapacita C_T (C18) bude mít hodnotu 0,22mF. Pokud napájecí napětí přesáhne referenční hodnotu, výstup obvodu se nebude nulovat až do chvíle, než se jeho hodnota sníží pod úroveň této hodnoty.

$$C_T = \frac{t_{PO}}{1,3 \cdot 10^4} \quad [\text{F}], \quad (15)$$

Podle vzorce (16) se dopočítá hodnota odporového děliče tak, aby byl časovací obvod spuštěn při úrovni 33V (alespoň 85% z 38,5V) nabíjeného napětí.

$$U_K = U_{REF} \left(\frac{R_6 + R_7}{R_8} + 1 \right) \quad [\text{V}], \quad (16)$$

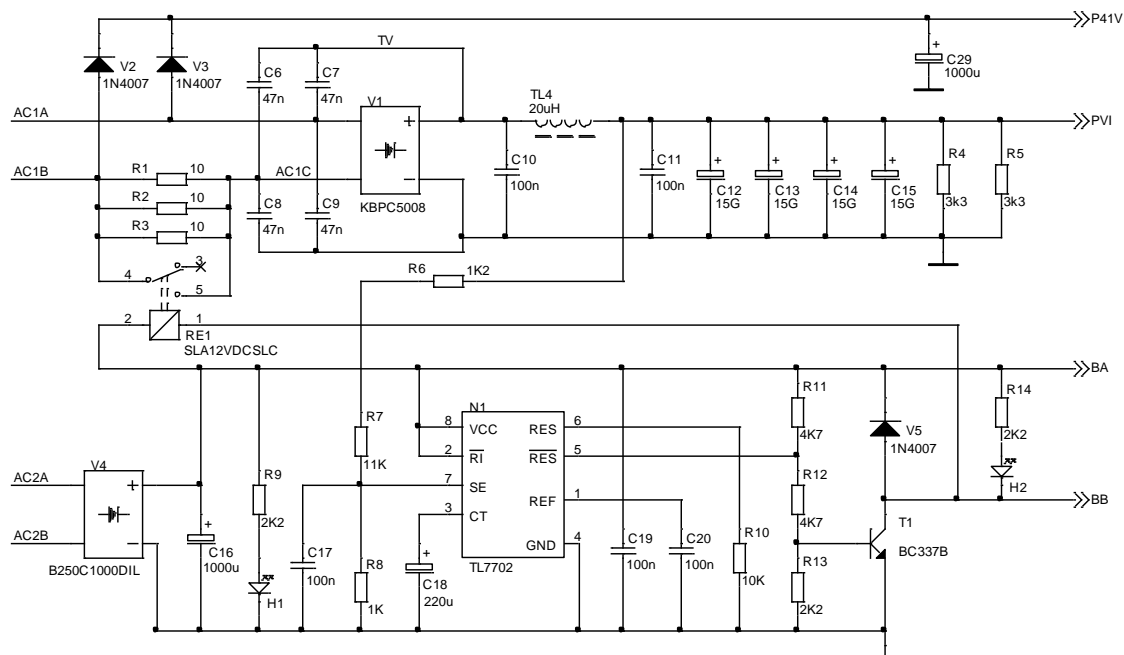
kde U_K je požadované napětí pro spuštění časovače, tedy 33V. Předpokladem je proud děličem 2,5mA, proto je zvolena hodnota $R_8 = 1k\Omega$. Hodnoty dalších odporů děliče pak budou $R_6 = 1,2k\Omega$ a $R_7 = 11k\Omega$.

Mezi vstupem REF integrovaného obvodu a zemí bude zapojen externí kondenzátor pro potlačení rušení z napájecího napětí (C20).

Na výstup je připojen přes odporový dělič tranzistor T1, který spíná relé RE1, zkratující po uplynutí požadovaných časových zpožděních nabíjecí rezistory. Diode V5 slouží k ochraně tohoto tranzistoru při vypnutí relé. Výstupní signál tohoto pomocného řídicího obvodu je rovněž veden do impulzního předregulátoru a dále do lineárního regulátoru. Signál umožňuje aktivaci impulzního předregulátoru a zapíná žádanou hodnotu výstupního napětí lineárního regulátoru. Diode H2 slouží k signalizaci tohoto stavu. Do okamžiku sepnutí relé je výskyt skutečného napětí na výstupních svorkách zdroje blokován tranzistorem T7.

Obvod je napájen pomocným napětím transformátoru ze sekundárního vinutí S_2 . Na tomto vinutí je připojený druhý můstkový usměrňovač a filtrační kondenzátor, což obstarává správné parametry napájecího napětí pro relé (12V) a integrovaný obvod TL7702. Usměrněné napětí dosahuje hodnoty cca 12,5V. LED dioda H1, zapojená sériově s rezistorem 2,2k Ω , indikuje přítomnost napětí na vstupu řízení zpožďovacího obvodu a bude využita na předním panelu pro indikaci zapnutí zdroje.

5.3.1 SCHÉMA USMĚRŇOVAČE A ŘÍZENÍ NABÍJENÍ



Obr. 5.3: Zapojení usměrňovače a řízení nabíjení filtračních kondenzátorů

5.4 IMPULZNÍ REGULÁTOR

Tato část zdroje by měla dodávat na vstup lineárního regulátoru napětí, které je cca o 3V větší než požadovaná hodnota výstupního napětí. V napěťovém režimu zdroje bude tedy dodávat 8V až 33V. V režimu proudového omezení bude výstupní napětí pulzního předregulátoru 3V až 33V. Předpokládaná vstupní hodnota napětí je 38,5V až 40V.

5.4.1 POPIS OBVODU

Jako základ pulzního regulátoru byl vybrán obvod LTC7303, synchronní spínací regulátor, a bude zapojen jako snižující DC/DC převodník [13]. Princip funkce snižujících převodníků je uveden v kapitole 4. Jde o integrovaný obvod, který je schopný zpracovávat vstupní napětí až 100V, výstupní napětí může být až 80V, obsahující zdroj referenčního napětí s přesností 1%. Obvod je schopen řídit výkonové tranzistory typu MOSFET s kanálem N prostřednictvím výkonových budících stupňů.

Konstantní pracovní frekvence je volitelná od 25kHz do 600kHz, výrobcem doporučený pracovní rozsah je 100kHz až 600kHz. Požadavkem na zdroj je vysoká účinnost, proto je s ohledem na ztráty výkonových tranzistorů a tlumivky vybrána nižší pracovní frekvence – 100kHz.

Obvod pracuje jako synchronní step-down regulátor, to znamená, že dioda, kterou prochází proud z tlumivky do zátěže, je zkratována tzv. synchronním spínacím tranzistorem typu MOSFET. Úbytek napětí na diodě bývá typicky 0,6V (Schottkyho dioda) a na tranzistoru v sepnutém stavu cca 200mV. Tepelné ztráty na tranzistoru jsou tedy nižší a účinnost regulátoru vyšší.

Obvod umožňuje prostřednictvím vstupu RUN, pinu 7, uvedení převodníku do stavu shutdown, ve kterém má velmi nízký odběr - 50μA. Tento vstup současně slouží k řízení rychlosti náběhu výstupního proudu (a tedy i napětí). Zapojení umožňuje prostřednictvím tohoto vstupu zablokování regulátoru v průběhu nabíjení filtračních kondenzátorů bezprostředně po zapnutí celého zařízení. Během nabíjení je tranzistor T2 v sepnutém stavu, nevzniká napětí na vstupu RUN a obvod je neaktivní. V okamžiku sepnutí relé zajistí optický člen N4 vypnutí tranzistoru T2 a dojde ke vzniku napětí na řídicím vstupu RUN. Tím je obvod funkcí soft-start uveden do aktivního stavu nabitím kondenzátoru C33. Určuje zpoždění a dobu náběhu. Pokud tento kondenzátor bude mít hodnotu 1μF, zpoždění bude 0,25s a doba náběhu 0,5s [13].

Integrovanou podpěťovou ochranou je zaručena správná funkce při náběhu a poklesu napájecího napětí. Při nárůstu napájecího napětí nad 8,7 V obvod může být obvod aktivní, při snížení tohoto napětí pod 6,2V se vypne.

Napájení integrovaného obvodu je přivedeno ze stabilizátoru napětí 11V se Zenerovou diodou V10. Jím je napájen budič synchronního MOSFETu na výstupu DRVCC, pin 11, přes filtrační RC článek napájecí vstup VCC (R24, C38, C39), pin 12, a dále přes spínací Schottkyho diodu vstup BOOST, pin 15 – napájení budiče horního spínače. Filtraci napětí a nízkaimpedanční zdroj energie zajišťují kondenzátory C34 a C35.

Aby bylo zajištěno neustálé napájení vstupu BOOST, je výrobcem stanovena minimální doba sepnutí synchronního MOSFETu – typicky 200ns, pro frekvenci 100kHz je to 2% periody. Po tuto dobu nevede horní spínač, což vede k omezení maximálního výstupního napětí. Výpočtem (17) je ověřeno, že při nejnižším vstupním napětí a nejvyšším výstupním napětí bude doba sepnutí synchronního spínače 14,3% (pro střidu 0,143). Rezerva je tedy dostatečná. Během této doby musí být doplněna energie do kondenzátorů C34 a C35 tak, aby mohla být použita horním spínačem. Čím je výstupní napětí větší, tím delší dobu setrvává horní tranzistor sepnutý, doba sepnutí synchronního tranzistoru je kratší, a doba nabíjení kondenzátorů je rovněž kratší. Dioda V10 musí mít proto velmi malý vnitřní odpor, bude použita Schottkyho dioda SB260 - 2A, 60V. Kondenzátory C40 a C41 tvoří nízkoimpedanční zdroj pro napájení budiče synchronního tranzistoru při jeho spínání. Hodnota SSDC určuje střidu synchronního spínače.

$$SSDC = \left(\frac{U_{IN} - U_{OUT}}{U_{IN}} \right) [-], \quad (17)$$

Nadproudová ochrana je řešena prostřednictvím snímání úbytku napětí na synchronním spínači.

Vstup MODE integrovaného obvodu je zapojen tak, aby obvod pracoval v režimu pulse skip mode. Tento mód zvyšuje účinnost při malém odběru. Odpovídající pin 1 je připojen na napájení.

Pokud je vstup INV, pin 6, připojen na nízkou úroveň (GND), obvod se stává snižujícím měničem buck (step-down).

5.4.2 HODNOTY PRVKŮ

Frekvenci je možné nastavit pomocí rezistoru R16 na vstupu FSET pinu 2 (18).

$$R_{16} = \frac{7100}{f * 10^{-3} - 25} \text{ [k}\Omega\text{]}, \quad (18)$$

Vypočtená hodnota tohoto rezistoru bude 95k Ω , volíme tedy 100k Ω rezistor a pracovní frekvence bude 96kHz.

Indukčnost tlumivky se stanoví dle (19).

$$L \geq \frac{U_{OUT}}{f * \Delta I_{L_{MAX}}} * \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN_{MAX}}} \right) \text{ [H]} \quad (19)$$

kde $\Delta I_{L_{MAX}}$ je volena kvůli vysoké účinnosti 10% z I_{VYST} , tedy $\Delta I_{L_{MAX}} = 1A$.

Minimální hodnota indukčnosti je 47 μH , bude tedy použita tlumivka s $L=60 \mu H$. Maximální proud tlumivkou je určen vztahem (20). Výpočtem je určen maximální proud tlumivkou 10,4A. Pro co nejvyšší účinnost nesmí být přesycována a musí mít co nejmenší vnitřní odpor. Bude tedy navržena pro průchod proudu až 14A, aby vznikla rezerva.

$$I_{MAX} = I_{OUT_{MAX}} + \left(\frac{U_{OUT}}{f * L * 2} * \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) \right) \text{ [A]} \quad (20)$$

Výběrová kritéria pro stanovení parametrů spínacích tranzistorů definuje literatura [13]. Závěrné napětí musí být s rezervou větší než maximální pracovní napětí (40V). Použity budou tranzistory se závěrným napětím minimálně 50V. Odpor v sepnutém stavu $R_{DS_{ON}}$ musí být co nejnižší s ohledem na vstupní kapacitu a maximální výstupní proud. Vstupní kapacita musí být co nejnižší kvůli budícím stupňům v integrovaném obvodu LTC3703. Při každém sepnutí dochází k přebíjení této kapacity a dochází ke spotřebě energie. Tato spotřeba je úměrná pracovní frekvenci, vstupní kapacitě tranzistoru a vstupnímu napětí tranzistoru. Aby tranzistor správně fungoval, je nutné dodat potřebné napětí U_g . Čím je však toto napětí větší, tím vznikají větší budící ztráty. Kompromisem je vybrána hodnota napájecího napětí 11V, zmenšeného o cca 0,5V průchodem diodou V11 na 10,5V. U vybraného tranzistoru IRFZ48N tomuto napětí odpovídá náboj $Q_g=45nC$ [14], a tedy bude proud pro napájení budiče MOSFETu podle (21) 4,5mA.

$$I = \frac{C \cdot U}{t} = \frac{Q}{t} = Q \cdot f \text{ [A]} \quad (21)$$

Obdobný proud bude nutný i pro správnou funkci synchronního MOSFETu. S těmito proudy je nutné počítat při návrhu stabilizátoru napájecího napětí. Na výkonových spínacích tranzistorech vznikají ztráty v sepnutém stavu průchozím proudem a při spínání. Podle literatury [13] jsou vodivostní ztráty přibližně 2,5W a spínací ztráty 5W pro horní spínač (T5) a 1,5W pro synchronní spínač (T6). Je tedy vhodné umístit tranzistory na chladiče.

Obvod má nastavitelné proudové omezení, řešené snímáním úbytku napětí na výkonovém tranzistoru. Velikost proudu se nastavuje rezistorem R18 na vývodu IMAX, pin 5. Hodnotu proudového omezení volíme o 30% vyšší, než bude výstupní proud (10A), tedy 13A. Aby byla správně určena hodnota rezistoru R18, je nutné znát elektrický odpor synchronního spínacího tranzistoru v sepnutém stavu $R_{DS_{ON}}$. Pro zvolený tranzistor IRFZ48N je to 24mΩ při teplotě 25°C. S rostoucí teplotou se tento odpor může zvýšit až o 30% ($\delta = 0,3$), tj. na 31mΩ. Vztah (22) určuje hodnotu napětí na rezistoru R18 na 0,41V. Hodnota samotného rezistoru je pak dána vztahem (23), tedy 34,17kΩ, a do obvodu je vybrán rezistor R18=36kΩ.

$$V_{PROG} = I_{MAX} \cdot (1 + \delta) R_{DS_{ON}} \text{ [V]}, \quad (22)$$

$$R18 = \frac{V_{PROG}}{12 \cdot 10^{-6}} \text{ [\Omega]}, \quad (23)$$

Schottkyho dioda V12 vede proud velice krátkou dobu, kdy je horní spínač rozepnutý a synchronní spínač ještě není sepnutý. Krátkodobě přes ni tedy protéká maximální proud I_{MAX} , proti kterému musí být odolná. Vybrána je dioda 50SQ100, která je dimenzována na trvalý proud 5A, ale snese impulzní proud až 290A[15].

Spínací tranzistory jsou chráněny proti přepětí ochranným obvodem, skládajícím se z rezistoru R25 a kondenzátoru C42.

U impulzních zdrojů je důležité, aby byla vstupní impedance horního spínače velmi malá. V praxi se tento požadavek řeší připojením keramických kondenzátorů paralelně

k vstupním elektrolytickým kondenzátorům. Obdobně jako u napájení obvodu, kondenzátory C36, C37 a keramický kondenzátor C11 u filtračních kondenzátorů tvoří nízkaimpedanční zdroj pro spínače DC/DC převodníku. Keramika těchto kondenzátorů je typu X7R z důvodu kvality materiálu[13].

Obdobně i výstupní kondenzátory musí mít malou impedanci. Díky impulzní charakteristice převodníku vzniká na kondenzátorech zvlnění. To musí být co nejmenší, aby nepronikalo přes lineární regulátor na výstup zdroje. Velikost zvlnění je přímo úměrná vnitřní impedanci kondenzátoru ESR a zvlnění proudu ΔI_L . Je nepřímou úměrná pracovní frekvenci a výstupní kapacitě podle vztahu (24).

$$\Delta V_{OUT} = \Delta I_L * \left(ESR + \frac{1}{8 * f * C_{OUT}} \right) \quad [V], \quad (24)$$

Nabíjecí a vybíjecí proudy ovlivňují životnost kondenzátoru, a proto bude paralelně zapojeno více elektrolytických kondenzátorů. Hodnota celkové kapacity C_{OUT} bude 3mF pro napětí 50V. Dle [16] je hodnota ESR zvolených kondenzátorů 0,023Ω. Předpokládané výsledné zvlnění napětí bude 24,25mV. Impulzní předregulátor má trvalou zátěž 3,3kΩ v podobě rezistoru R26, která při nulovém odběru proudu z lineárního stabilizátoru zajišťuje stabilitu regulace.

5.5 ŘÍZENÍ IMPULZNÍHO REGULÁTORU

Výstupní napětí impulzního předregulátoru zajišťuje napájení lineárního regulátoru. Je předpokladem, že jeho hodnota bude vždy o 2 až 3 volty vyšší než hodnota výstupního napětí zdroje. Zpětnou vazbou z výstupu bude zajištěno, že podle požadavku na výstupní napětí bude impulzní regulátor dodávat napětí cca 3 až 33V.

Výstupní napětí impulzního předregulátoru určují prvky R22, R29 s TP4, R30 s TP3 a hodnota referenčního napětí řídicího obvodu. Rezistor R22 má hodnotu 4,4kΩ. Rezistor R30 s trimrem TP3 zajišťují změnu výstupního napětí s požadavkem lineárního stabilizátoru. Dynamiku a stabilitu regulace určují R28 s C47 a R17 s C31 a C32. Jsou zapojeny podle [13], jako loop type 3.

5.5.1 PRINCIP ŘÍZENÍ

Řídicí obvod má vnitřní referenci 0,8V, která není vyvedena. Na vstupu FB, pin 4, je tohoto napětí vždy dosaženo. Budou-li rezistory R30 s TP3 připojeny na nulové napětí (GND), bude na výstupu největší požadované napětí (33V). Bude-li se zvyšovat napětí na těchto rezistorech, výstupní napětí bude klesat. Předpokladem je nastavování řídicího napětí v rozsahu 0V až cca 7V, které bude nepřímou úměrné výslednému výstupnímu napětí pulzního regulátoru v rozsahu 3V až 33V.

Níže uvedené vztahy (25) až (28) použijeme pro stanovení velikostí rezistorů. Pro snadné nastavení jsou rezistory zpětné vazby navrženy tak, že je výsledná hodnota složená z odporu rezistoru a odporu přiřazeného trimru.

$$I_1 = \frac{U_{REF}}{R_{22}} \quad [A], \quad (25)$$

$$I_2 = \frac{U_{PVO}-U_{REF}}{R_{29}+TP4} \quad [A], \quad (26)$$

$$I_3 = \frac{U_R-U_{REF}}{R_{30}+TP3} \quad [A], \quad (27)$$

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad [A], \quad (28)$$

U_{REF} je referenční napětí obvodu LTC3703, tj. 0,8V

U_{PVO} je výstupní napětí impulzního DC/DC převodníku, tj. 3V až 33V

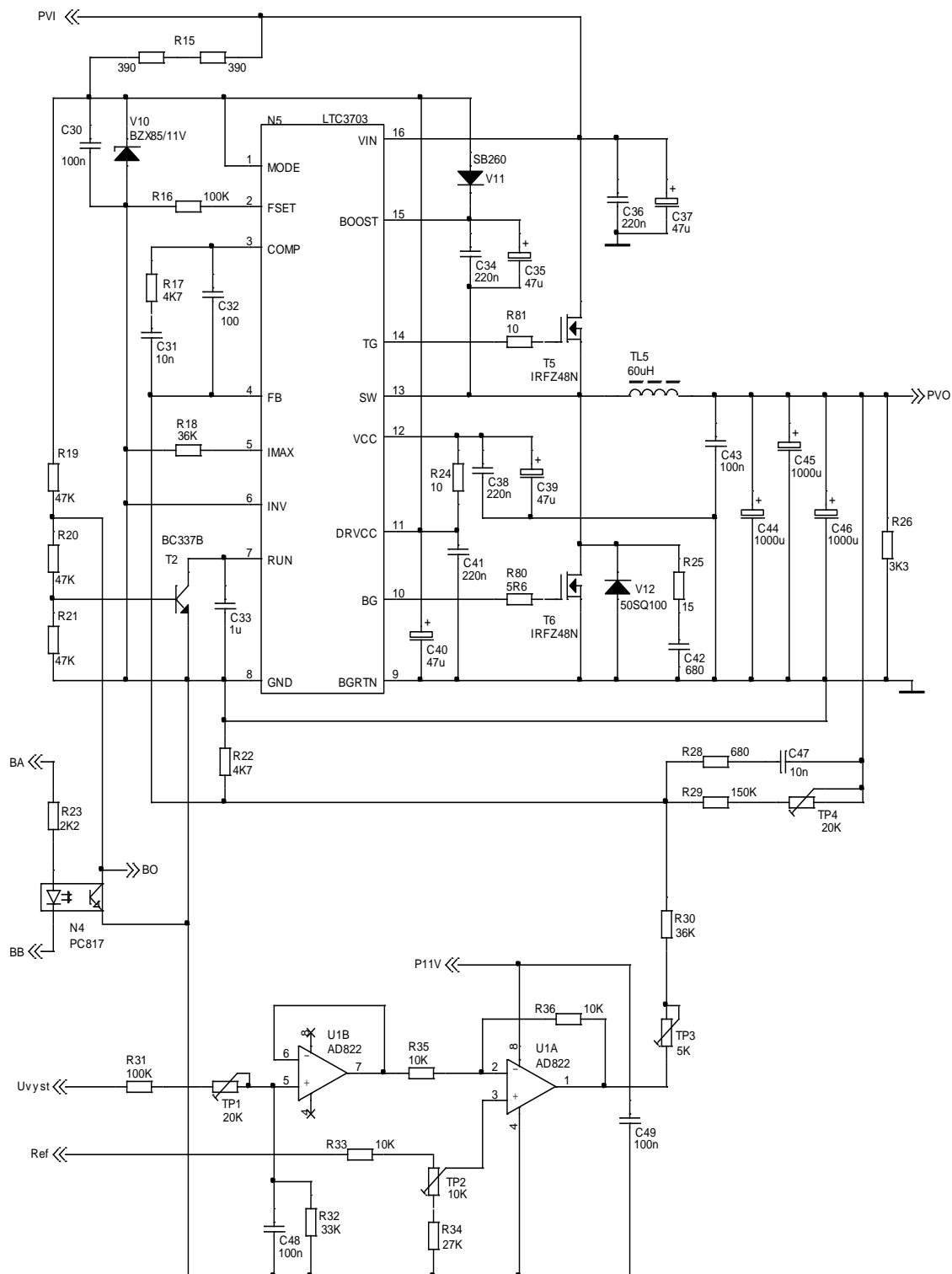
U_R je řídicí napětí zpětné vazby, tj. 0V až 7V

$$\frac{U_{REF}}{R_{22}} = \frac{U_{PVO}-U_{REF}}{R_{29}+TP4} + \frac{U_R-U_{REF}}{R_{30}+TP3} \quad [A], \quad (29)$$

Řešením rovnic s dosazením hodnot známých napětí za daných podmínek vyjdou hodnoty rezistorů R_{29} s $TP4$ a R_{30} s $TP3$. Hodnoty rezistorů s trimry konkrétně vycházejí $R_{30} + TP3 = 36,886k\Omega$ a $R_{29} + TP4 = 158,085k\Omega$. Budou zvoleny rezistory z řady E24, které budou doplněny trimry, nastavenými na přesnou hodnotu.

Napětí U_R zajišťuje dvojitý operační zesilovač U1. Napětí získané z děliče $R_{31}+TP1$ a R_{32} je impedančně přizpůsobeno zesilovačem U1B pro použití v invertujícím zesilovači U1A. Děličem R_{33} , $TP2$ a R_{34} je nastavena polovina napětí U_R , tj. 3,5V. Obvod funguje takto: Při nulovém výstupním napětí je i nulové napětí na výstupu U1B a na výstupu U1A je 7V. Při výstupním napětí 30V je za děličem $R_{31}+TP1$ a R_{32} napětí 7V, na výstupu U1B také 7V a za invertujícím zesilovačem 0V. Tím je dosaženo požadovaných napětí. Invertující zesilovač je standardně zapojen s rezistory 10k Ω . Kondenzátor C48 filtruje výstupní napětí děliče, kondenzátor C49 filtruje napájecí napětí obvodu U1.

5.5.2 SCHÉMA IMPULZNÍHO PŘEDREGULÁTORU



Obr. 5.4: Zapojení impulzního předregulátoru a zpětné vazby

5.6 LINEÁRNÍ REGULÁTOR

Lineární stabilizátor zajišťuje regulaci výstupního napětí a proudu. Regulátor může pracovat v proudovém nebo v napěťovém režimu. Tím je zaručena odolnost zdroje vůči zkratu na výstupu. Lineární zdroj obsahuje samostatný regulátor napětí a samostatný regulátor proudu, které řídí výstupní napětí.

Pro zpracování signálu jsou použity dvojité operační zesilovače AD822 [19], umožňující zpracovávat vstupní signály od nuly při kladném napájecím napětí s výstupem rail to rail. Pro zesilování proudového signálu je použit velmi přesný operační zesilovač typu OP113[20], umožňující zpracování signálu od nuly při kladném napájení s výstupem rail to rail a s možností nulování vstupního offsetu. Jak bylo rozebráno v teorii práce, stabilita, přesnost a šum výstupního napětí a proudu určují kvalitu zdroje. Jako zdroj referenčního napětí je tedy použit velice přesný a stabilní zdroj REF195 [18].

5.6.1 PRINCIP PRÁCE OBVODU

Lineární zdroj je složen z výkonového stupně, referenčního zdroje, napájecích obvodů, regulátoru proudu, regulátoru napětí, obvodů žádané hodnoty napětí a proudu, obvodu pro zobrazení pracovního režimu a zesilovače snímače proudu.

Pomocí spínače S2 je možné vypnout výstupní napětí, výstup však nebude odpojen od vnitřního obvodu regulátoru. Operační zesilovač U2A, který řídí výstupní tranzistory zdroje, je napájen ze stabilizovaného napětí cca 34V, získaného ze stabilizátoru se sériově zapojenými Zenerovými diodami V15, V16 a V17. Napájení této části je bráno z hlavního vinutí transformátoru S1. Je provedeno pomocným usměrňovačem V2 a V3 s filtračním kondenzátorem C29. Toto napájecí napětí je nutné proto, aby výstup operačního zesilovače poskytl výstupní napětí cca 31,5V, nutné k tomu, aby na výstupu bylo 30V.

Tento operační zesilovač tedy svým výstupem řídí výkonové tranzistory T3 a T4. Jeho zesílení je dáno rezistory R50 a R48. Je voleno přibližně 6, aby vstupní napětí zesilovače U2A bylo na úrovni referenčního napětí. R48 bude mít hodnotu 10k Ω , aplikací vztahu (30) bude mít R50 hodnotu 50k Ω . Z řady E24 je vybrána hodnota 51k Ω . Zesílení není nutné volit přesně, protože funkční zpětná vazba regulátoru napětí nebo proudu toto výstupní napětí doreguluje. Aby zdroj umožňoval přechod z napěťového do proudového režimu a obráceně, jsou výstupy jednotlivých regulátorů připojeny k řídicímu zesilovači U2A přes diody. Podrobnější popis je uveden v podkapitole 6.6.4.

Na diodách vzniká při regulaci úbytek napětí a na neinvertujícím vstupu je tedy napětí o tento úbytek větší. Aby byla zajištěna regulace napětí od 0V, musí být na invertující vstup zesilovače U2A přivedeno napětí větší, než je úbytek na diodách. Řešením je zdroj pomocného napětí, sestávající se z diod V19 a V20 a rezistoru R47. Tyto dvě diody jsou pak zdrojem předpětí cca 1,4V pro invertující vstup U2A zesilovače. Filtračním kondenzátorem předpětí je C58. Rezistor R51 a C54 zajišťují stabilitu koncového stupně. Nevyužitý operační zesilovač U2B má neinvertující vstup uzemněn, invertující vstup je propojen s výstupem.

Výkonový stupeň lineárního stabilizátoru je řešen paralelním zapojením tranzistorů T3 a T4. Jde o tranzistory v Darlingtonově zapojení s vysokým zesílením (5000), uložené v izolovaném pouzdru TO247 [17]. Izolované pouzdro umožňuje snadnou a bezproblémovou montáž tranzistorů na chladič, spolehlivá izolace je vždy zaručena. Tranzistory mají v emitorech zapojeny rezistory R52 a R53, které slouží k rovnoměrnému rozložení výstupního proudu. Úbytek napětí na rezistorech je volen cca 120mV při maximálním výstupním proudu. Předpokládá se, že tento úbytek zajistí rovnoměrné rozložení proudu mezi oba tranzistory. Velikost rezistorů je pak v tomto případě cca 24mΩ. Tranzistory jsou přemostěny diodou V21, která je chrání proti neřízenému přiložení napětí k výstupu zdroje uživatelem. Dioda V22 je zapojena na výstup v závěrném směru a chrání zdroj proti zátěži, která by měla opačnou polaritu, tedy slouží jako ochrana proti připojení přepólované zátěže. Rezistor R54 tvoří zátěž stabilizátoru. Výstupní proud se snímá z rezistoru R55, na kterém při plném výstupním proudu vzniká úbytek 100mV.

Zdroj referenčního napětí je tvořen integrovaným obvodem N6. Toto referenční napětí má hodnotu 5V. Kondenzátor C57, zapojený na výstup integrovaného obvodu, zajišťuje stabilitu referenčního napětí.

Napájecí napětí je pro všechny integrované obvody 11V, kromě obvodu U2. Je získáno ze stabilizátoru tvořeného Zenerovou diodou V17.

5.6.2 SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ

Výstupní napětí je získáno z děliče R56 a R57 s TP7. Při výstupním napětí 30V je na výstupu děliče cca 5V, tj. cca referenční napětí. Napětí z děliče je impedančně přizpůsobeno integrovaným obvodem U6A. Výstup tohoto obvodu je použit pro zobrazení skutečné hodnoty výstupního napětí. Z referenčního napětí je pomocí děliče R41, potenciometru TP8 a rezistoru R42 získána žádaná hodnota výstupního napětí. Rezistor R42 slouží k nastavení požadované spodní meze výstupního napětí (5V). Rezistor R41 je nahrazen drátovou propojkou, protože maximální možná hodnota výstupního napětí odpovídá referenčnímu napětí 5V a je potřeba, aby výstupní napětí z potenciometru dosahovalo referenčního napětí.

Bude-li mít rezistor R42 nulovou hodnotu, lineární zdroj bude umožňovat regulaci výstupního napětí od 0V. Napětí z potenciometru je vedeno přes dolní propust R43 C55 na vstup operačního zesilovače U3A, který zajišťuje impedanční přizpůsobení. Tento výstup současně slouží pro zobrazení žádané hodnoty napětí. Z výstupu U3A přes rezistory R44 a R45 je napětí vedeno jako žádaná hodnota do vlastního regulátoru napětí. Spínač S2, který slouží k vypínání výstupního napětí, je zapojen mezi nulový potenciál (GND) a spoj rezistoru R44, R45. Při jeho sepnutí klesne napětí na neinvertujícím vstupu regulátoru napětí na nulovou hodnotu. Výstupní napětí také klesne na nulovou hodnotu, avšak žádaná hodnota na výstupu U3A zůstane nezměněna. Kondenzátor C59 tvoří spolu s rezistory R44 a R45 dolní propust pro požadovanou hodnotu napětí. Zdvojené kontakty spínače S2 zapínají signalizační diodu LED. Paralelně připojený unipolární tranzistor T7 umožňuje blokování výstupního napětí při nabíjení filtračních kondenzátorů.

Žádaná a skutečná hodnota napětí se porovnávají v regulátoru, který tvoří operační zesilovač U4A. Součástky R58, R59, C61 a C62 určují stabilitu a dynamiku napěťového regulátoru. Výstup regulátoru napětí je veden přes diodu V23 do řídicího zesilovače výstupního napětí U2A.

5.6.3 SNÍMÁNÍ PROUDU

Z referenčního napětí je pomocí děliče R60, potenciometru TP8 a rezistoru R61 získána žádaná hodnota výstupního proudu. Rezistory R60 a R61 slouží k nastavení požadovaných mezí výstupního proudu. Protože je minimální výstupní proud nastavitelný na nulu a maximální výstupní proud je roven 10A, jsou rezistory R61 a R60 nahrazeny drátovou propojkou. Rezistor R61 má nulovou hodnotu, protože regulace proudu probíhá od 0V. Rezistor R60 má také nulovou hodnotu, protože plná hodnota výstupního proudu odpovídá referenčnímu napětí.

Je potřeba, aby výstupní napětí z potenciometru dosahovalo hodnoty referenčního napětí. Jsou tedy nahrazeny drátovou propojkou. Napětí z potenciometru je vedeno přes dolní propust R62, C63 na vstup operačního zesilovače U3B, který zajišťuje impedanční přizpůsobení. Tento výstup současně slouží pro zobrazení požadované hodnoty proudu a je veden na vstup regulátoru U4B.

Skutečná hodnota proudu, získaná na rezistoru R56, je zesílená operačním zesilovačem U5 tak, aby výstupní proud 10A odpovídal referenčnímu napětí. Obvod je zapojen jako neinvertující zesilovač. Jeho zesílení je dáno poměrem rezistorů R65 a R67 s TP10 plus 1 podle (30). Toto zesílení musí být 50, neboť je nutné na výstupu získat referenční napětí 5V ze vstupního napětí 100mV při odběru 10A zátěží. Hodnota R65 je zvolena 4,7kΩ. R67+TP10 bude tedy mít hodnotu 230,3kΩ. Opět se vybírá rezistor z řady E24 a potenciometrem doladí přesná hodnota.

$$A = 1 + \left(\frac{R67+TP10}{R65} \right) = \frac{R65+R67+TP10}{R65} = 50 \quad (30)$$

Potenciometr TP10 slouží k přesnému nastavení výstupního proudu. Potenciometr TP9 slouží k nastavení nulového napětí na výstupu zesilovače U6. Jako zesilovač byl vybrán přesný operační zesilovač typu OP113. Jeho výstup rail to rail umožňuje rozkmit výstupního napětí v plných mezích napájecího napětí. Pro správnou funkci je zatížen jeho výstup rezistorem R70, aby jeho výstupní napětí pro nulový proud bylo 0V. Výstup tohoto obvodu je použit pro zobrazení skutečné hodnoty výstupního proudu.

Žádaná a skutečná hodnota proudu se porovnávají v regulátoru, který tvoří operační zesilovač U4B. Součástky R68, R69, C68 a C67 určují stabilitu a dynamiku proudového regulátoru. Výstup regulátoru proudu je veden přes diodu V24 do řídicího zesilovače výstupního napětí U2A.

5.6.4 NAPĚŤOVÝ A PROUDOVÝ REŽIM

Výstupy regulátorů napětí a proudu před diodami V23 a V24 jsou vedeny do komparátoru U6B. Ten zajišťuje zobrazení pracovního režimu zdroje. V napěťovém režimu svítí dioda

H3, v proudovém režimu dioda H4. Regulátor, který ovládá výstupní napětí, je ten, který má nižší hodnotu výstupního napětí na výstupu příslušného regulátoru.

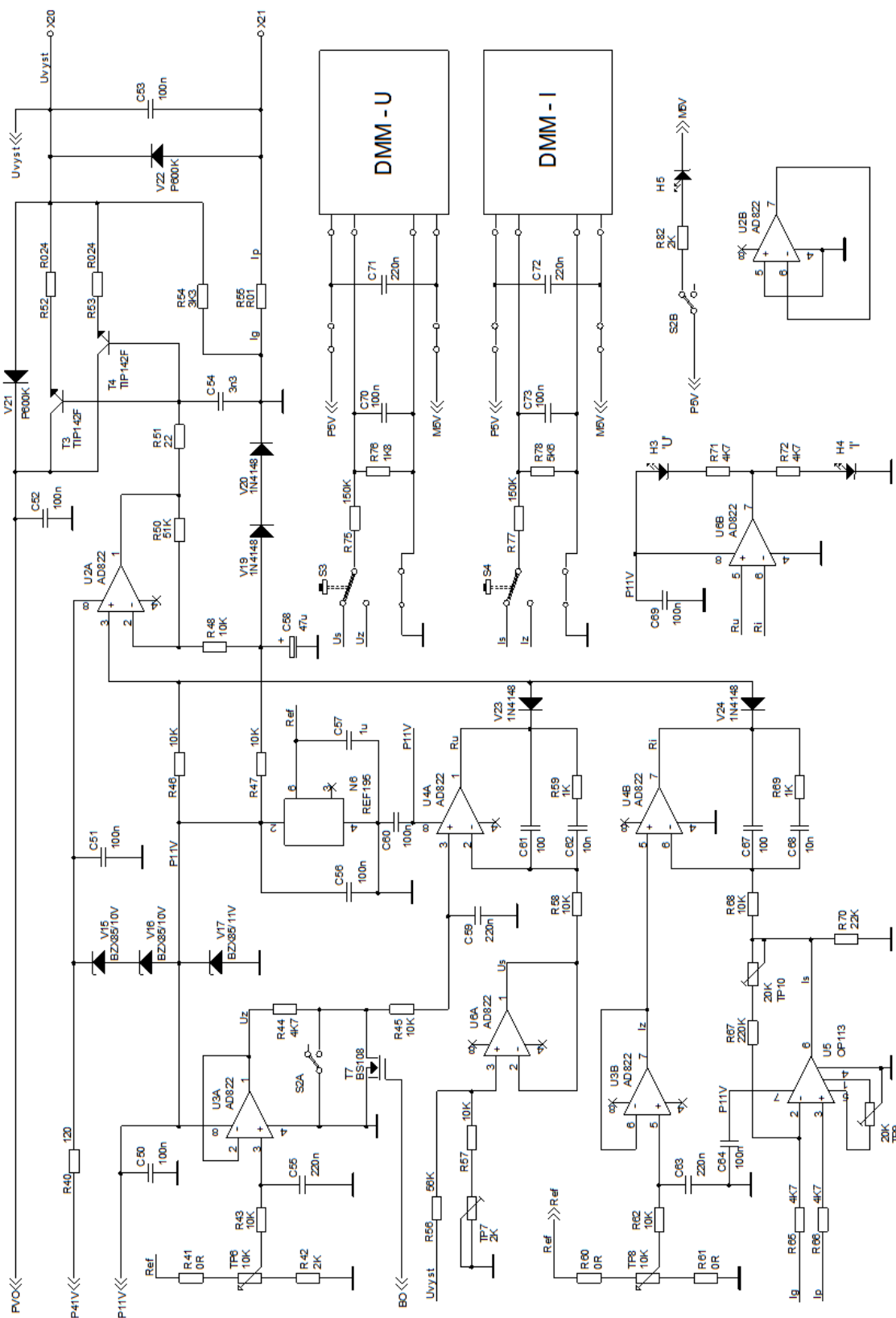
Pracuje-li zdroj v proudovém režimu, je napětí na výstupu obvodu U4B menší než napětí na výstupu U4A a přes diodu V24 snižuje vstupní hodnotu napětí zesilovače U2A tak, aby bylo dosaženo na výstupu zdroje žádané hodnoty proudu.

Pracuje-li zdroj v napětíovém režimu, je napětí na výstupu obvodu U4A menší než napětí na výstupu U4B a přes diodu V23 snižuje vstupní hodnotu napětí zesilovače U2A tak, aby bylo dosaženo na výstupu zdroje žádané hodnoty napětí.

Pokud není na výstupu dosaženo žádané hodnoty proudu, regulátor proudu U4B se dostane do kladné saturace. Dioda V24 v závěrném směru zamezí jeho vlivu na hodnotu výstupního napětí.

Pokud není na výstupu dosaženo žádané hodnoty napětí, regulátor napětí U4A se dostane do kladné saturace. Dioda V23 v závěrném směru zamezí jeho vlivu na hodnotu výstupního proudu.

5.6.5 SCHÉMA LINEÁRNÍHO REGULÁTORU S MĚŘÍCÍMI PŘÍSTROJI



Obr. 5.5: Zapojení lineárního regulátoru a měření

5.7 ZOBRAZENÍ PROUDU A NAPĚTÍ

Zdroj je vybaven panelovými voltmetry pro zobrazení proudu a napětí. Použity jsou tři a půl místné voltmetry, které umí zobrazit maximální hodnoty 1999. Z praktických důvodů jsou voleny voltmetry se sedmisegmentovým LED displayem, nikoliv s LCD displayem. Preferované je jasné čitelné zobrazení i ve tmě, což červeně svítící LED display umožňuje.

Zapojení dovoluje při stlačení tlačítka zobrazit i úroveň žádaných hodnot proudu a napětí. Pokud nejsou tlačítka stlačena, voltmetry zobrazují skutečné výstupní hodnoty napětí a proudu.

5.7.1 ZOBRAZENÍ NAPĚTÍ

Rozlišení zobrazovaného napětí je proto pouze 0,1V. Použitím tři a tři čtvrtě místného voltmetru se zobrazením 3999 by rozlišení zobrazovaných hodnot mohlo být 0,01V. Tyto přístroje jsou však téměř nesehnatelné. Zobrazovaná velikost napětí je tedy maximálně 30,0, což je z celého rozsahu, který poskytuje voltmetr, pouze cca 15%. Dělič napětí R75, R76 zajišťuje vhodnou velikost napětí pro zobrazení. Maximální hodnota napětí (30V) odpovídá referenčnímu napětí 5V. Rozsah voltmetru je 400mV pro zobrazení 1999. Pro zobrazení hodnoty 300 je tedy zapotřebí 60mV. Dělič musí mít na výstupu 60mV v případě, že zdroj dodává na výstup 30V. Hodnoty rezistorů tohoto děliče jsou nastaveny podle (31), kde U_{R76} je výstupní napětí děliče. Při $U=5V$ je toto napětí 60mV. Hodnota rezistoru R76 bude zvolena na 1,8kΩ a hodnota R75 bude dopočítána. Velikost R75 pak vychází na 148,2kΩ.

$$U_{R76} = \frac{U \cdot R76}{R75 + R76} [V] \quad (31)$$

Protože voltmetr umožňuje nastavení zobrazeného údaje svým potenciometrem v rozmezí několika procent, je volen rezistor R75 150kΩ. Při výstupním napětí 30V pak lze tímto potenciometrem nastavit zobrazení 30,0V. Tlačítkový přepínač S3 slouží k zobrazení skutečné nebo žádané hodnoty napětí. Při stlačení se zobrazí žádaná hodnota napětí. Tato funkce je vhodná v případě, že zdroj pracuje v proudovém omezení. Stlačení tlačítka je možné zjistit, na jakou hodnotu stoupne napětí v případě odlehčení zátěže. Kondenzátor C70 filtruje hodnotu zobrazeného napětí.

5.7.2 ZOBRAZENÍ PROUDU

Při použití stejného voltmetru pro zobrazení proudu je rozlišení zobrazovaného proudu 0,01A. Použití tři a tři čtvrtě místného voltmetru se zobrazením 3999 není nutné, neboť rozlišení by zůstalo stejné. Zobrazovaná velikost proudu je tedy maximálně 10,00, což je z celého rozsahu, který poskytuje voltmetr cca 50%. Dělič napětí R77, R78 zajišťuje vhodnou velikost napětí pro zobrazení. Maximální hodnota proudu (10A) odpovídá referenčnímu napětí 5V. Rozsah voltmetru je 400mV pro zobrazení 1999. Pro zobrazení hodnoty 1000 je tedy zapotřebí 200mV. Dělič musí mít na výstupu 200mV v případě, že zdroj dodává na výstupu 10A. Hodnoty rezistorů tohoto děliče jsou nastaveny podle (32), kde U_{R78} je výstupní napětí děliče, a při $U=5V$ je toto napětí 200mV. Hodnota rezistoru R78 bude zvolena na 5,6kΩ a hodnota R77 bude dopočítána. Velikost rezistoru R77 pak vychází na 134,4 kΩ.

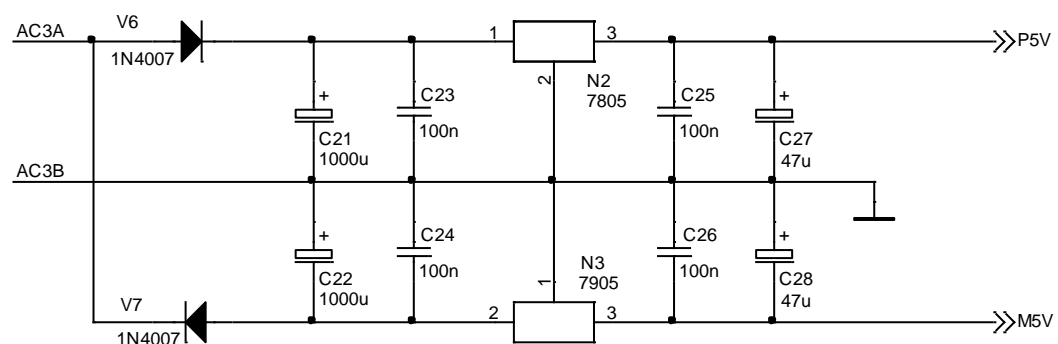
$$U_{R78} = \frac{U \cdot R78}{R77 + R78} [\text{V}] \quad (32)$$

Protože voltmetr umožňuje nastavení zobrazeného údaje svým potenciometrem v rozmezí několika procent, byl zvolen rezistor R77 150kΩ. Při výstupním proudu 10A pak lze tímto potenciometrem nastavit zobrazení 10,00A. Tlačítkový přepínač S4 slouží k zobrazení skutečné nebo žádané hodnoty proudu. Při stlačení se zobrazí žádaná hodnota proudu. Tato funkce je vhodná v případě, že zdroj pracuje v napětěovém režimu. Stlačením tlačítka je možné zjistit, na jakou hodnotu vzroste proud zátěží v případě zvětšení zátěže (než dojde k dosažení hodnoty takové, aby se režim zdroje změnil na proudový, tedy než dojde k proudovému omezení). Kondenzátor C73 filtruje hodnotu zobrazeného proudu.

5.7.3 NAPÁJENÍ ZOBRAZOVACÍCH PŘÍSTROJŮ

Napájení přístrojů je provedeno ze stabilizovaného zdroje +5V a -5V. Je odebíráno z třetího sekundárního vinutí transformátoru S3 po jeho jednocestném usměrnění. Je vybrán stabilizátor kladného napětí 7805 a stabilizátor záporného napětí 7905. Odběr z kladné větve je cca 60mA pro každý voltmetr, odběr ze záporného stabilizátoru je zanedbatelný. Kondenzátory C21 a C22 filtrují usměrněné výstupní napětí. Kondenzátory C23, C24, C25 a C26 zajišťují stabilitu stabilizátorů. Kondenzátory C71 a C72 jsou filtry napětí přímo u voltmetrů.

5.7.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJENÍ MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ



Obr. 5.6: Napájecí obvody měřicích přístrojů

6. REALIZACE

K realizaci navrhovaného laboratorního zdroje byla pořízena přístrojová skříň UKP30. Všechny součásti zdroje jsou umístěny v této skříni. Součásti a elektronické komponenty zdroje (tab. 6.1) byly zajišťovány především prostřednictvím firmy GM electronic [20], dále pak prostřednictvím firmy GES [21] a Semictrade [22].

6.1 SEZNAM SOUČÁSTEK

označení ve schématu	hodnota	popis
C1, C2	4n7Y	kondenzátor fóliový KNB2520 Y2
C3, C4	22n X	kondenzátor fóliový CFAC X2
C6, C7, C8, C9	47n	kondenzátor keramický X7R 100V
C10, C11, C17, C19, C20, C23, C24, C25, C26, C30, C43, C48, C49, C50, C51, C52, C53, C56, C60, C64, C69, C70, C73	100n	kondenzátor keramický X7R 100V
C12, C13, C14, C15	15mF	kondenzátor elektrolytický KL5 63V
C16, C21, C22	1mF	kondenzátor elektrolytický TM 25V
C29	1mF	kondenzátor elektrolytický KM 50V
C44, C45, C46	1mF	kondenzátor elektrolytický GLR 50V
C18	220uF	kondenzátor elektrolytický THRS 35V
C27, C28, C35, C37, C39, C40, C58	47uF	kondenzátor elektrolytický KLL 63V
C31, C47, C62, C68	10n	kondenzátor fóliový CF1 100V
C32, C61, C67	100pF	kondenzátor keramický NPO 500V
C33, C57	1uF	kondenzátor fóliový CF1 50V
C34, C36, C38, C41, C55, C59, C63, C71, C72	220nF	kondenzátor keramický X7R 50V
C42	680pF	kondenzátor keramický NPO 500V
C54	3n3	kondenzátor fóliový CF1 100V
F1	T3.15A	pojistka radiální T3,15A/250V
F2	T15A	pojistka radiální T15A/125V
H1, H2, H3, H5	LED 3mm	dioda LED zelená
H4	LED 3mm	dioda LED červená
N1	TL7702	integrováný obvod DIL8
N2	7805	integrováný obvod TO220
N3	7905	integrováný obvod TO220
N4	PC817	optický člen
N5	LTC3703	integrováný obvod SSOP16
N6	REF195	integrováný obvod DIL8
DMM – U, DMM – I	HD-3129A	panelový voltmetr, 3½ místný, červený
RE1	SLA12VDCSLC	relé 12V, 30A, 240VAC
R1, R2, R3	10	rezistor 5W, 5%
R4, R5, R26, 54	3k3	rezistor 2W, 5%

R6	1K2	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R7	11K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R8, R59, R69	1K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R9, R13, R14, R23	2K2	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R10, R33, R35, R36, R43, R45, R46, R47, R48, R57, R58, R62, R68	10K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R11, R12, R17, R22, R44, R65, R66, R71, R72	4K7	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R15	2x390	rezistor 2W, 5%
R16, R31	100K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R18, R30	36K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R19, R20, R21	47K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R24, R81	10	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R25	15	rezistor 2W, 5%
R29, R75, R77	150K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R32	33K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R34	27K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R40	120	rezistor 2W, 5%
R41, R60, R61	0R	drátová propojka
R42, R82	2K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R50	51K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R51	22	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R52, R53	24mΩ	rezistor 350-8 5%
R55	10mΩ	rezistor TO220, MP916
R56	56K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R67	220K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R70	22K	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R76	1K8	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R78	5K6	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
R80	5R6	rezistor vel. 0207 0,6W 1%
S1		Přepínač kolébkový ON/OFF
S2		tlačítkový přepínač modrý
S3, S4		přepínací tlačítko zelené, červené
TL1	2x1,5 mH	tlumivka odrušovací TL34P
TL2, TL3, TL4	20uH	tlumivka odrušovací WK
TL5	60uH	tlumivka impulzní TRONIC 13A
TP2	10K	rezistorový trimr 64Y
TP6, TP8	10K	potenciometr precizní PM534
TP1, TP4, TP9, TP10	20K	rezistorový trimr 64Y
TP7	2K	rezistorový trimr 64Y
TP3	5K	rezistorový trimr 64Y
T1, T2	BC337B	tranzistor bipolární NPN
T3, T4	TIP142F	Tranzistor bipolární, Darlington NPN

T5, T6	IRFZ48N	tranzistor unipolární N-Kanál TO220
T7	BS108	tranzistor unipolární N-Kanál TO92
U1, U2, U3, U4, U6	AD822	integrovaný obvod, DIL8
U5	OP113	integrovaný obvod, DIL8
V1	KBPC5008	diodový můstek 250V/800V I=50A
V2, V3, V5, V6, V7	1N4007	dioda usměrňovací 1000V 1A DO-41
V4	B250C1000	diodový můstek 250V 1A
V10, V17	BZX85/11V	dioda Zenerova DO41 1,3W
V11	SB210	dioda Shottky 100V 2A
V12	50SQ100	dioda Shottky 100V 5A
V15, V16	BZX85/10V	dioda Zenerova DO41 1,3W
V19, V20, V23, V24	1N4148	dioda 75V 150mA DO-35
V22, V21	P600K	dioda 800V 6A

Tab. 6.1: Seznam součástek

K přichycení hlavní desky plošných spojů k nosné části byly použity dielektrické distanční sloupky DA15.

Protože tranzistory T5 a T6 nejsou uloženy v izolovaném pouzdře, jsou na chladič upevněny šrouby přes slídové izolační podložky.

Pro připojení výstupních svorek a sekundárních vinutí transformátoru k desce jsou použity pružinové svorky WAGO série 256.

Součástky umístěné na předním panelu jsou k hlavní desce plošných spojů připojeny pomocí jednořadých dvou a tří pinových konektorů. LED diody jsou upevněny k přednímu panelu prostřednictvím kovových držáků a tlačítka jsou podepřena malým pájivým polem, které je přišroubováno k přednímu panelu z vnitřní strany zdroje. Přístrojové zdíčky jsou typu K205 a umožňují přímé připojení vodiče nebo zasunutí svorky.

Modul GSW6762SI obsahuje síťový napájecí konektor, pojistku a hlavní síťový vypínač, a je umístěn v levé zadní části zdroje vedle chladiče. Zdroj je vybaven síťovou šňůrou KEU3.

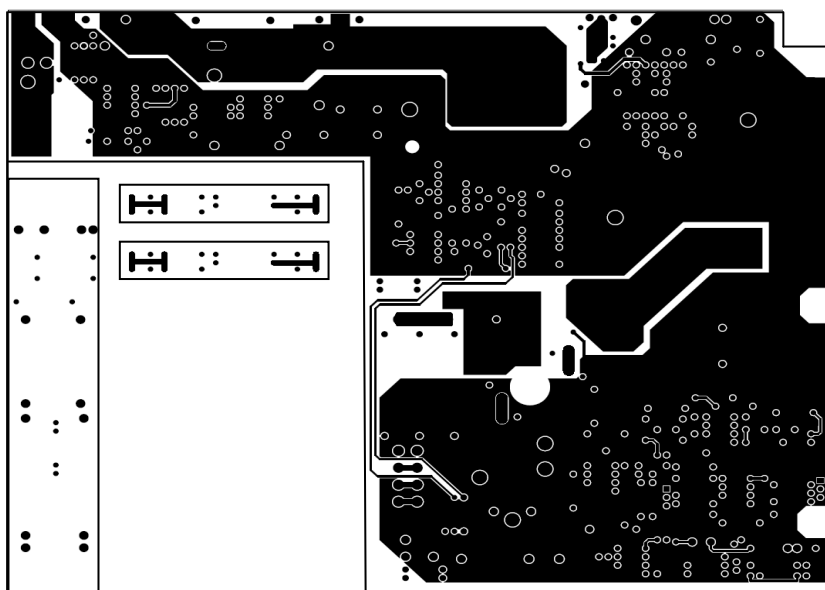
6.2 NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE

Při návrhu bylo nutné dbát na rozmístění součástek. Vedení by měla být co nejkratší, zem spojena v jeden celek. Z důvodu nezbytnosti chladit výkonové tranzistory bylo nutné tyto součástky rozmístit tak, aby mohly být po vsazení desky plošných spojů do skříně tepelně spojeny s chladičem, tedy na zadní část desky. Ostatní součástky byly rozmístěny podle obecných doporučení, například skupinově podle funkce.

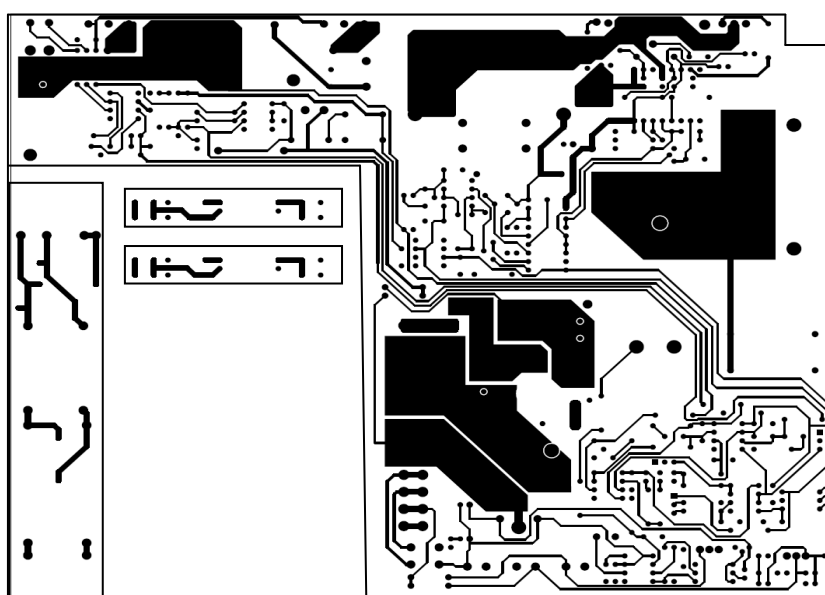
Plošný spoj je vyroben z oboustranně plátovaného materiálu FR4 tloušťky 1,5mm. Aby byla zajištěna nízká impedance výkonových spojů, je použita tloušťka mědi 70μm, technika vylívaných ploch a jejich přímého propojení s prokovenými otvory desky plošných spojů. Obě strany desky plošných spojů jsou překryty ochrannou nepájivou

maskou. Potisk nebyl při výrobě požadován. Řídící integrovaný obvod spínaného předregulátoru N5 v pouzdře SSOP16 je z praktických důvodů umístěn na samostatném modulu, sloužícím zároveň jako redukce roztečí vývodů na 2,54mm. Tento modul je umístěn prostřednictvím 16 pinové patice nad deskou plošných spojů. Některé filtrační kondenzátory a další komponenty jsou umístěny přímo pod modulem.

Pro úsporu materiálu při výrobě plošného spoje byly plošné spoje vstupního síťového filtru a obvodů připojení k zobrazovačům napětí a proudu umístěny ve výřezu hlavního plošného spoje (obr. 6.1 a obr. 6.2). Vyrobená deska byla rozřezána frézou na hlavní desku plošných spojů ve tvaru „L“, dvě malé desky pro voltmetry a desku pro filtraci a potlačení rušení na vstupu transformátoru.



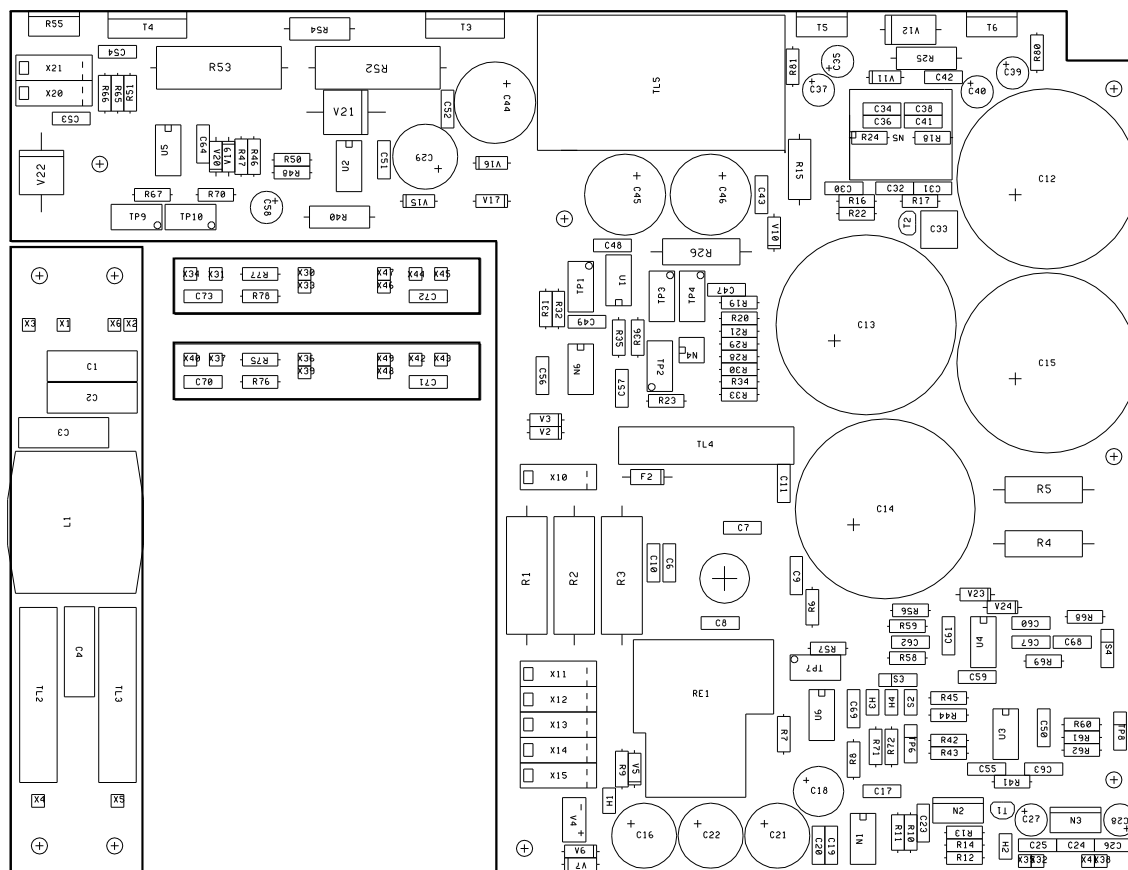
Obr. 6.1: Horní strana desky plošného spoje



Obr. 6.2: Spodní strana desky plošného spoje

6.3 OSAZENÍ PLOŠNÉHO SPOJE

Některé rezistory a kondenzátory byly do desky plošných spojů osazeny přes patice, aby bylo možné později jejich hodnotu změnit. Jedná se především o takové prvky, které se vyskytují v děličích, a pomocí kterých se nastavují další parametry zdroje, jako je například stabilita regulace a pracovní frekvence. Osazená deska plošných spojů je zobrazena na obrázku 6.3.



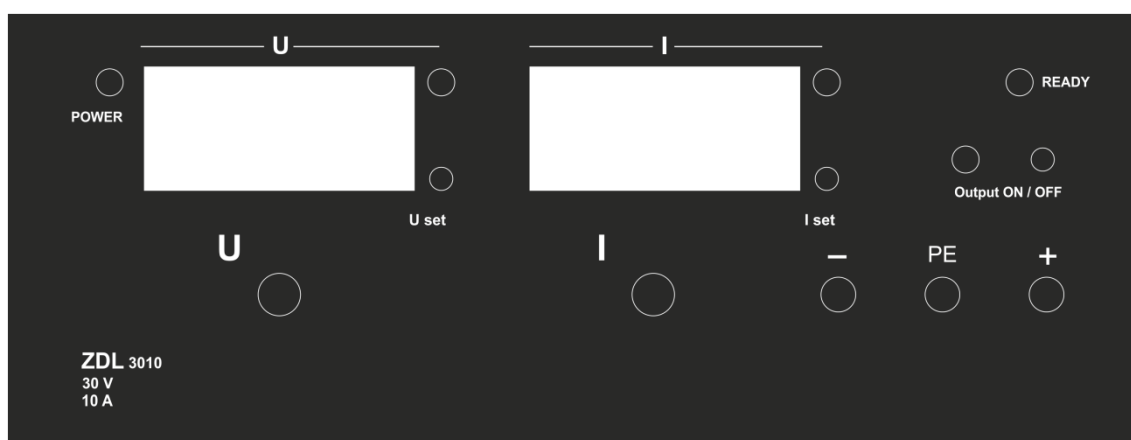
Obr. 6.3: Osazovací plán zdroje

6.4 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Jako nosná část desky byl použit duralový plát s výškou 5mm, který zároveň slouží jako podpora odvodu tepla pod deskou plošných spojů a je sešroubován se zadní stěnou. Tato duralová deska je připevněna na dno skříně a je na ní umístěn transformátor, deska plošných spojů a zadní čelo s chladičem. Jako chladič je použit profil PADA 8071 délky 100mm s tepelným odporem 0,83K/W. Pro zlepšení chlazení, zamezení koroze a mechanickému poškození je chladič eloxován černým eloxem.

Deska plošných spojů je připevněna přes distanční sloupky. Diodový můstek V1 je umístěn pod deskou plošných spojů a je chlazen nosnou deskou. Transformátor je umístěn ve výřezu desky plošných spojů. Deska se vstupním síťovým odrušovacím filtrem je připevněna s důrazem na izolaci nad transformátorem. Izolace je provedena dielektrickou

Přední panel je zobrazen na obr. 6.4. V levém horním rohu je umístěna LED dioda, která indikuje zapnutí zdroje. V pravém horním rohu se nachází LED dioda, která indikuje „připravenost“ zdroje, tedy sepnutí relé a připojení napětí na spínanou část zdroje. Modrý tlačítkový přepínač umožňuje elektronicky odpojit výstupní napětí zdroje. Přítomnost výstupního napětí na svorkách indikuje LED dioda, umístěná nalevo od tohoto přepínače.



Obr. 6.4: Potisk předního panelu

Na předním panelu jsou dále umístěny přístroje pro měření výstupního proudu a napětí. Na levém měřicím přístroji lze odečítat aktuální hodnotu výstupního napětí. Po stisknutí zeleného přepínacího tlačítka lze zobrazit požadovanou hodnotu napětí, které se nastavuje potenciometrem, umístěným pod měřicím přístrojem napětí. Obdobně lze odečítat hodnotu skutečného a žádaného proudu z pravého měřicího přístroje, sloužícího pro zobrazování proudu. Po stisknutí červeného přepínacího tlačítka je zobrazena požadovaná hodnota výstupního proudu, nastavená odpovídajícím potenciometrem. Napravo od zobrazovacích jednotek svítí vždy jedna z LED diod podle aktuálního režimu zdroje. V pravé spodní části předního panelu jsou umístěny svorky pro připojení zátěže. Prostřední svorka je propojena s ochranným síťovým vodičem. V případě potřeby je možné ji propojit s výstupem zdroje.

Při konstrukci zdroje bylo na přední panel vykresleno rozvržení podle parametrů panelových přístrojů a dalších komponentů. Dané části panelu byly vyvrtány, obroušeny a zahlazeny. Na plastový kryt byl nalepen potištěný samolepící papír a následně průhledná ochranná fólie. Byly prořezány otvory a upevněny všechny komponenty.

Velmi pevně byly dotaženy svorky pro připojení zátěže a potenciometry, aby se po čase neuvolnily.

7. PARAMETRY VYROBENÉHO ZDROJE

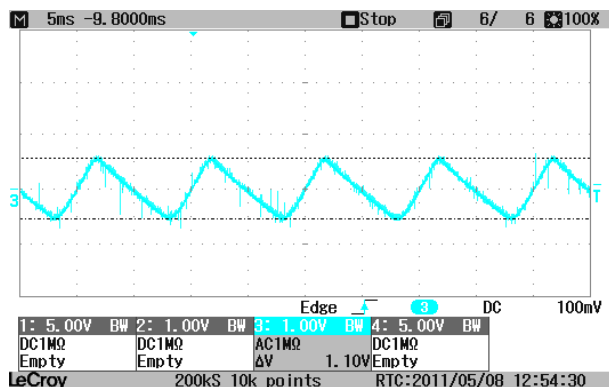
V první části kapitoly je měření věnováno klasickým charakteristikám zdrojů. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulkách a závislosti vyneseny do grafů. Zakresleno je také zapojení obvodu měření a je uvedena specifikace měřicích přístrojů.

Druhá část kapitoly je věnována spíše charakteristickému chování zdroje, jeho odezvám a průběhům signálů při zapnutí, vypnutí, zkratu a jiných. Tyto vlastnosti jsou zaznamenány výlučně jako obrázky z osciloskopu.

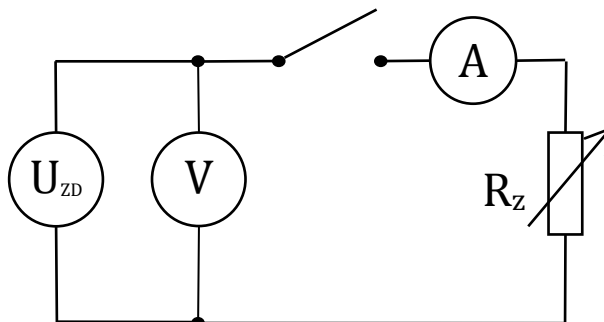
7.1 ZVLNĚNÍ NAPĚTÍ NA VÝSTUPU

Na obrázku 7.1 je záznam zvlnění napětí na filtračních kondenzátorech z osciloskopu LeCroy waveJet 314, sériové číslo LCRY0101J24835. V teoretické části bylo zjištěno, že toto zvlnění by mělo být maximálně 1,5V. Reálné zvlnění na těchto kondenzátorech je 1,1V a podmínka správné funkce zdroje je tedy splněna.

Měření zvlnění napětí na výstupu bylo provedeno podle schéma zapojení na obr. 7.2. Multimetrem ESCORT 97, true RMS byla měřena efektivní hodnota střídavého napětí, hodnoty tedy odpovídají obsahu plochy pod křivkou zvlnění napětí. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 7.1 a graf na obrázku 7.3 vyobrazuje závislost efektivní hodnoty zvlnění výstupního napětí na velikosti výstupního napětí. Obrázek 7.4 pak zobrazuje reálný průběh zvlnění napětí na výstupu sejmutý osciloskopem při výstupním napětí 10V a výstupních proudech 0A, 5A a 10A.



Obr. 7.1: Zvlnění napětí na filtračních kondenzátorech



Obr. 7.2: Schéma zapojení měření zvlnění

U_{zd} výstupní napětí zdroje

V.....ESCORT 97 true RMS multi-display multimeter, sériové číslo 7080286

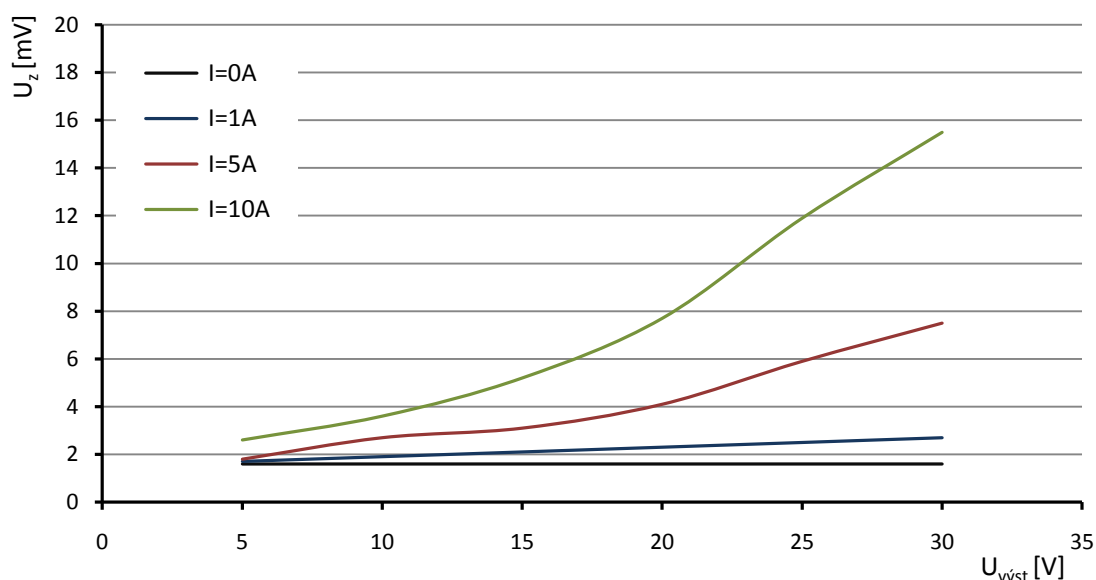
A.....METEX M-3850 multimeter, sériové číslo EI939079

R_zproměnná zátěž 0Ω až 10Ω

$U_{výst}[V]$	5	10	15	20	25	30
$U_z[mV] \quad I=0A$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
$U_z[mV] \quad I=1A$	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7
$U_z[mV] \quad I=5A$	1,8	2,7	3,1	4,1	5,9	7,5
$U_z[mV] \quad I=10A$	2,6	3,6	5,2	7,7	11,9	15,5

Tab. 7.1: Zvlnění napětí na výstupu

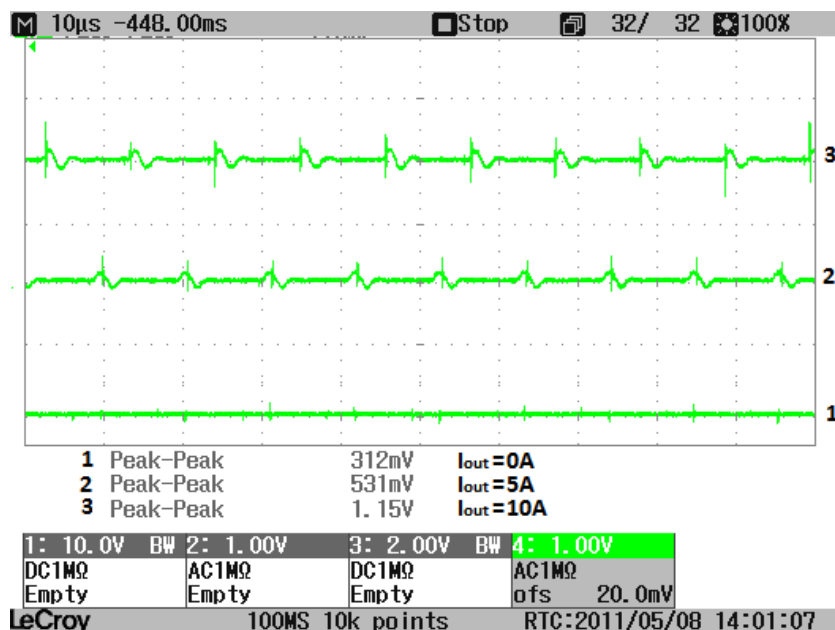
U_z efektivní hodnota zvlnění napětí při různých hodnotách výstupního proudu



Obr. 7.3: Zvlnění napětí na výstupu zdroje

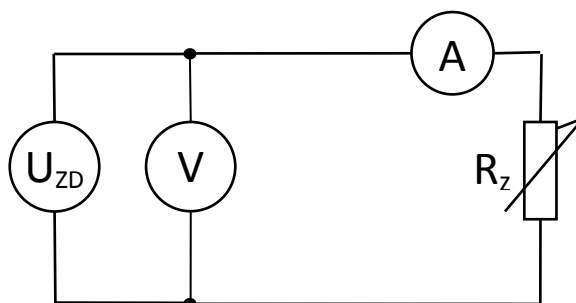
Z naměřených hodnot je patrné, že při malé hodnotě výstupního napětí je efektivní hodnota zvlnění velmi malá. S rostoucím nárokem na výstupní výkon tato hodnota narůstá. Maximální zvlnění laboratorního zdroje nastává při jeho maximálních výstupních hodnotách proudu i napětí a odpovídá hodnotě 15,5mV. Komplexně vzato je tato hodnota zvlnění velmi malá a na výstupním napětí pro aplikace se nijak špatně neprojeví. Nezhoršuje tedy kvalitu zdroje.

Z pohledu měření zvlnění jako rozdílu maximální a minimální hodnoty napětí neboli peak to peak je hodnota zvlnění napětí na výstupu podstatně vyšší. Při maximálních výstupních hodnotách napětí a proudu zdroje byla osciloskopem naměřena hodnota zvlnění 1,15V. Je však složena nejen ze zvlnění, ale také z namodulovaného rušení impulzním regulátorem, které nebylo zcela potlačeno lineárním regulátorem.



Obr. 7.4: Reálné zvlnění napětí na výstupu zdroje při $U_{\text{výst}}=30\text{V}$

7.2 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA



Obr. 7.5: Schéma zapojení měření V-A charakteristiky

U_{ZD} výstupní napětí zdroje

V..... ESCORT 97 true RMS multi-display multimeter, sériové číslo 7080286

A..... METEX M-3850 multimeter, sériové číslo EI939079

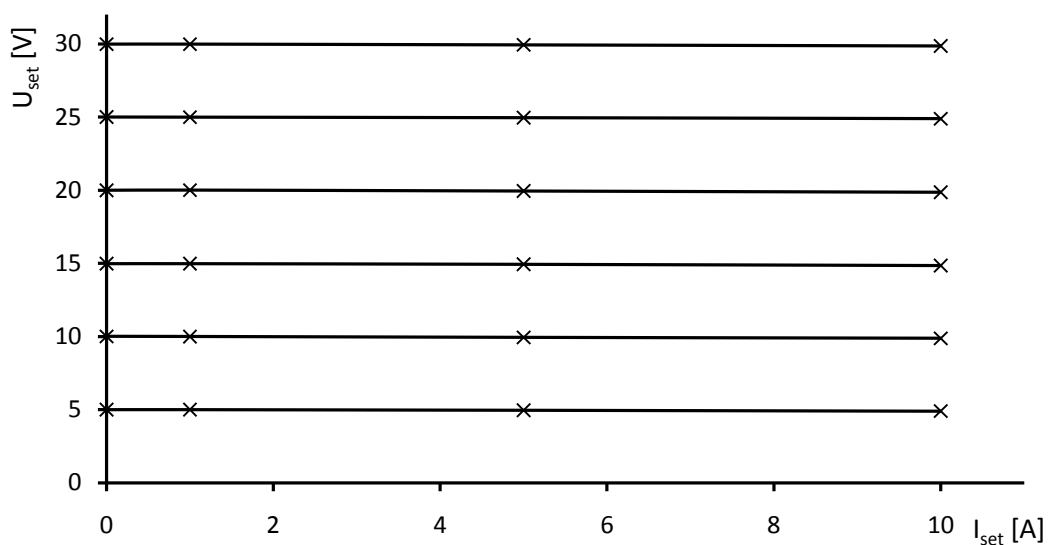
R_zproměnná zátěž 0Ω až 10Ω

7.2.1 NAPĚŤOVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE

Při měření napěťové charakteristiky byla nastavována hodnota výstupního napětí v rozsahu 5V až 30V. Pro každou z těchto hodnot napětí byla nastavena hodnota výstupního proudu v rozsahu 0A až 10A. Do tabulky 7.2 byly zaznamenány hodnoty napětí změřené multimetrem ESCORT 97 podle obr. 7.5. a závislost velikosti nastaveného napětí na hodnotě proudu je vykreslena v grafu na obrázku 7.6.

$U_{\text{výst}}[\text{V}]$	$I=0\text{A}$	$I=1\text{A}$	$I=5\text{A}$	$I=10\text{A}$
5	5,01	5,01	4,97	4,91
10	10,01	10,00	9,94	9,88
15	14,98	14,98	14,94	14,86
20	20,00	20,01	19,95	19,87
25	25,01	25,00	24,96	24,89
30	29,99	29,99	29,94	29,87

Tab. 7.2: Napěťová charakteristika zdroje



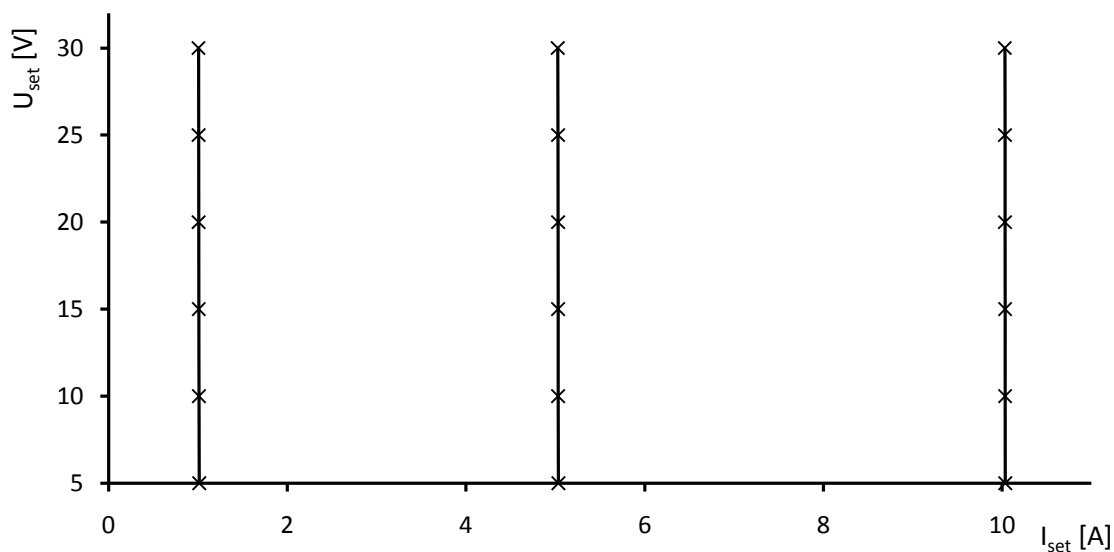
Obr. 7.6: Napěťová charakteristika zdroje

7.2.2 PROUDOVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE

Při měření proudové charakteristiky byla nastavována hodnota výstupního proudu v rozsahu 0A až 10A. Pro každou z těchto hodnot proudu byla nastavena hodnota výstupního napětí v rozsahu 5V až 30V. Do tabulky 7.3 byly zaznamenány hodnoty proudu změřené multimetrem METEX M-3850 podle obr. 7.5. a závislost velikosti nastavovaného proudu na hodnotě výstupního napětí je vynesena do grafu na obrázku 7.7.

$I_{\text{výst}} [\text{A}]$	$U=5\text{V}$	$U=10\text{V}$	$U=15\text{V}$	$U=20\text{V}$	$U=25\text{V}$	$U=30\text{V}$
0	-	-	-	-	-	-
1	1,013	1,01	1,008	1,007	1,006	1,005
5	5,033	5,031	5,031	5,03	5,029	5,027
10	10,034	10,033	10,033	10,032	10,032	10,03

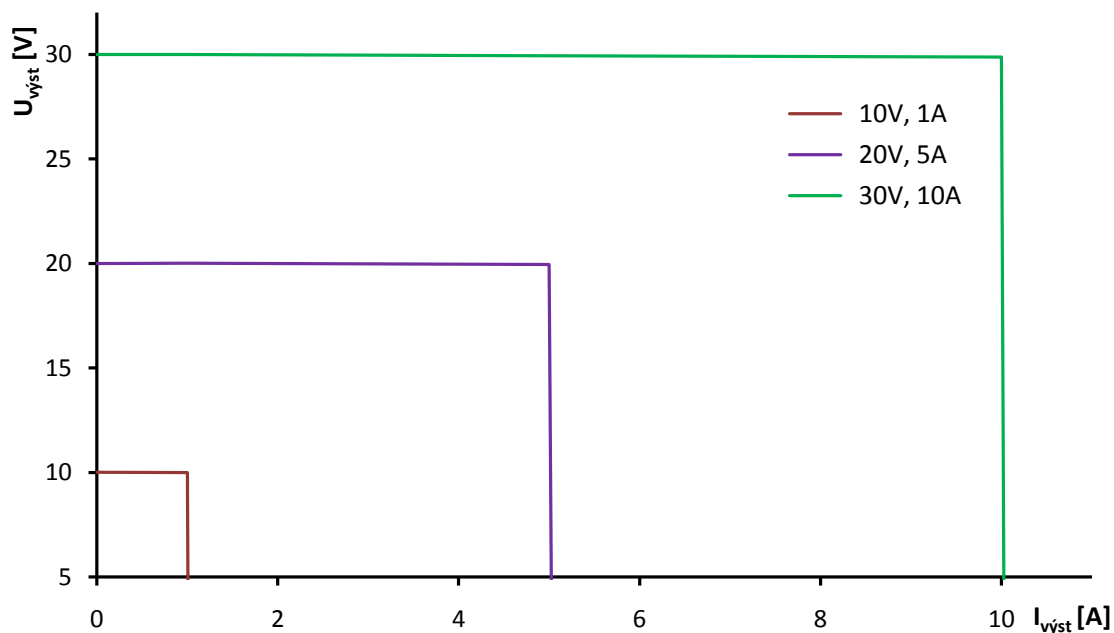
Tab. 7.3: Proudová charakteristika zdroje



Obr. 7.7: Proudová charakteristika zdroje

7.2.3 VLASTNÍ VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA

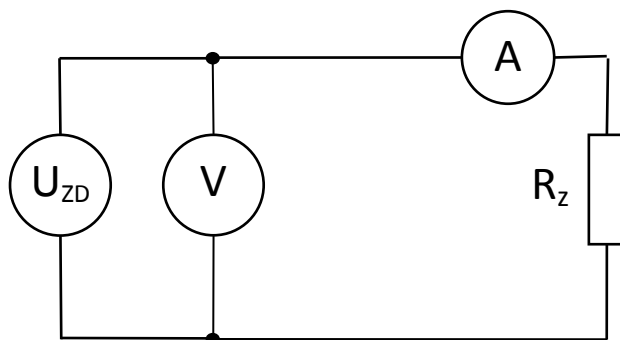
Voltampérová charakteristika vzniká spojením napěťových a proudových charakteristik zdroje, pracujícím nejprve v napěťovém a poté v proudovém režimu. Zdroj má nastavené omezení výstupních hodnot a při zvyšování hodnoty připojené zátěže stoupá nárok na odběr energie. Zdroj pak pracuje v napěťovém nebo proudovém omezení. Tyto voltampérové charakteristiky zdroje jsou pro některé z kombinací omezení napětí a proudu, naměřených a zapsaných do tabulek 7.2 a 7.3, zobrazeny v grafu na obr. 7.8.



Obr. 7.8: Voltampérová charakteristika zdroje

7.3 MĚŘENÍ ČASOVÉ STABILITY

Časová stabilita udává stálost nastavených výstupních parametrů zdroje v průběhu času. Tato charakteristika byla měřena podle zapojení na obr. 7.9 po dobu 4 hodin. Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 7.4 a vyneseny do grafů. Stálost hodnot byla velmi dobrá, proto byly grafům přidány sekundární osy. Každá z křivek v grafech na obrázcích 7.10 a 7.11 má tedy své vlastní rozlišení.



Obr. 7.9: Schéma zapojení měření časové stability zdroje

U_{ZD} výstupní napětí zdroje

V..... ESCORT 97 true RMS multi-display multimeter, sériové číslo 7080286

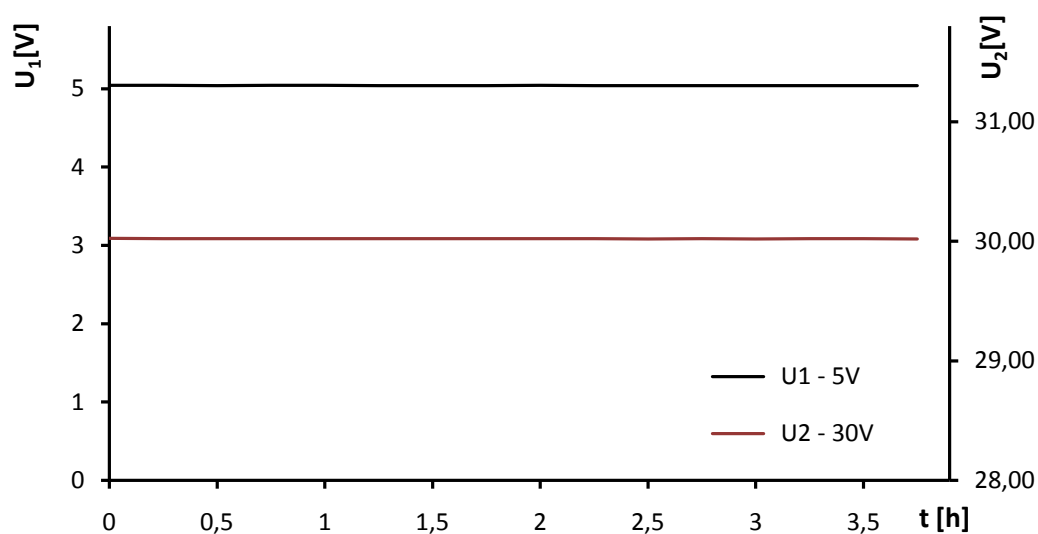
A..... METEX M-3850 multimeter, sériové číslo EI939079

R_Zkonstantní zátěž 5 Ω , 6 Ω

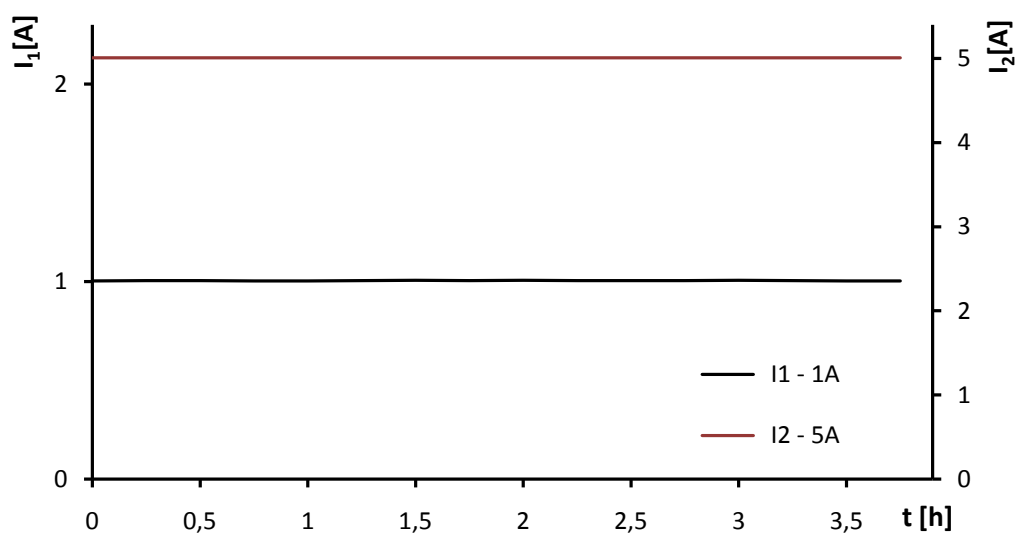
t [h]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
U_1 [V]	5,043	5,042	5,041	5,042	5,042	5,041	5,041	5,041
U_2 [V]	30,024	30,022	30,022	30,021	30,021	30,021	30,021	30,021
I_1 [A]	1,004	1,005	1,005	1,005	1,004	1,005	1,005	1,005
I_2 [A]	5,008	5,008	5,008	5,007	5,008	5,007	5,007	5,007

t [h]	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75
U_1 [V]	5,042	5,041	5,041	5,041	5,041	5,041	5,041	5,041
U_2 [V]	30,021	30,021	30,020	30,021	30,020	30,021	30,021	30,020
I_1 [A]	1,005	1,005	1,005	1,005	1,004	1,005	1,004	1,004
I_2 [A]	5,008	5,007	5,007	5,007	5,007	5,007	5,007	5,007

Tab. 7.4: Časová stabilita zdroje



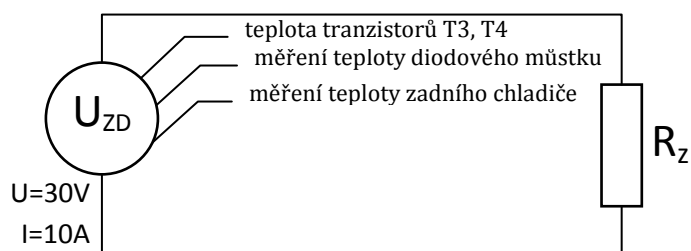
Obr. 7.10: Časová stabilita výstupního napětí zdroje



Obr. 7.11: Časová stabilita výstupního proudu zdroje

7.4 MĚŘENÍ TEPLOTY ZATÍŽENÉHO ZDROJE

Měření probíhalo při zapnutém maximálním výstupním výkonu zdroje, tedy při výstupním napětí 30V a proudu 10A na odporové zátěži 3Ω . Zdroj byl zapojen do obvodu podle obrázku 7.12. Po dobu 2,5 hodiny byla po intervalech 15 minut sondou snímána teplota ze zadního chladiče, z výkonových tranzistorů T3 a T4 v Darlingtonově zapojení a ze šroubu, kterým je na nosnou desku (pomocný chladič) připevněn diodový můstek V1. Tento šroub prochází středem diodového můstku. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 7.5 a vyneseny do grafické závislosti, kterou lze vidět na obrázku 7.13.



Obr. 7.12: Schéma zapojení měření teploty

t [h]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
T _{ch} [°C]	22	28	35	40	44	46	48	49	50	50	50
T _d [°C]	22	36	47	55	59	63	65	66	67	67	68
T _t [°C]	22	31	38	44	47	50	52	54	55	56	57

Tab. 7.5: Měření teploty při maximální zátěži

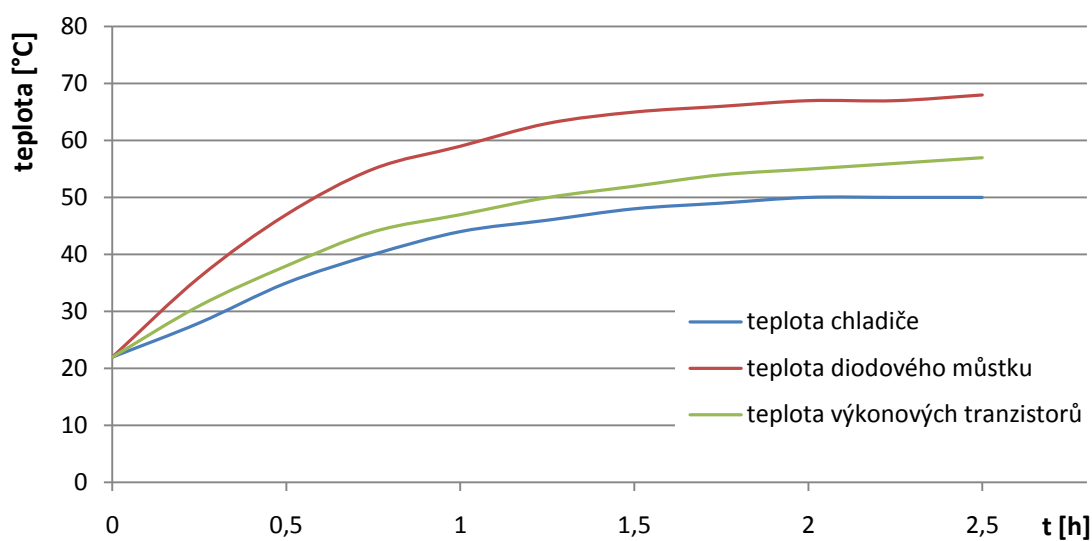
T_{ch} teplota chladiče

T_d teplota na usměrňovacím diodovém můstku

T_t teplota na tranzistorech T3, T4 v Darlingtonově zapojení

K měření byl použit multimetr METEX M-3850 s teplotní sondou a dále zátěžový reostat METRA s maximální zatížitelností 500V, 10A s hodnotou elektrického odporu 6,7Ω.

Vysoká teplota byla naměřena na transformátoru, jehož tepelné ztráty jsou téměř totožné se ztrátami zbytku zařízení (viz kapitola 7.5) při největším zatížení zdroje. Po dvou hodinách provozu kolísala teplota transformátoru kolem hodnoty 72 °C.



Obr. 7.13: Graf závislosti teploty na době provozu pro maximální výkon

7.5 ÚČINNOST ZDROJE

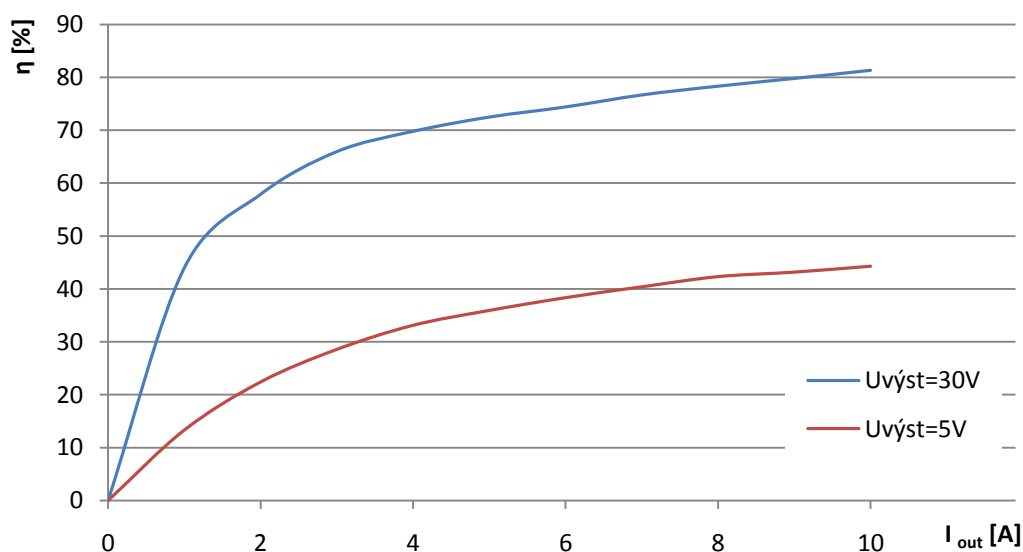
Měření bylo provedeno měřičem výkonu, wattmetrem METRA PvLz 0,2, číslo výroby 7056254. Výstupní výkon byl získán roznásobením hodnot výstupního napětí a proudu, odečítaných na digitálních zobrazovačích na předním panelu zdroje. Tyto hodnoty byly zaznamenány společně s odpovídající hodnotou příkonu zdroje do tabulky 7.6 a následně vyneseny do grafu na obrázku 7.14.

V porovnání s teorií je účinnost vyrobeného zdroje mírně nižší. Tento rozdíl je způsoben účinností transformátoru. Podle teorie je účinnost obvodů regulátorů a dalších při maximálním výkonu přibližně 91%. Měřena však byla celková účinnost zdroje, tedy obvodů včetně transformátoru. Z výsledků pak vyplývá, že účinnost transformátoru je ($\eta = 0,813 / 0,91 \cdot 100$) 89,5%.

P_{in} [W]	26	68,25	103,7	136,5	172	207	242	274	306,5	338,5	369
U_{out} [V]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
I_{out} [A]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{out} [W]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
η [%]	0,00	43,96	57,86	65,93	69,77	72,46	74,38	76,64	78,30	79,76	81,30

P_{in} [W]	26,25	37,54	44,63	52,5	60,375	69,6	78,23	86,63	94,5	104,2	112,9
U_{out} [V]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
I_{out} [A]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{out} [W]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
η [%]	0,00	13,32	22,41	28,57	33,13	35,94	38,35	40,40	42,33	43,18	44,30

Tab. 7.6: Účinnost zdroje



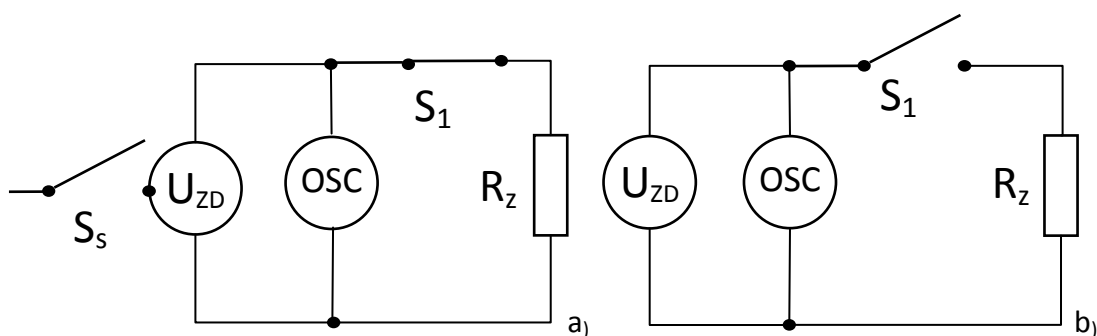
Obr. 7.14: Účinnost zdroje v závislosti na výstupním proudu

7.6 ZAPÍNÁNÍ A VYPÍNÁNÍ ZDROJE

Zachyceny jsou průběhy signálů ve zdroji za specificky definovaných podmínek a při konkrétních změnách výstupních parametrů. K měření byl použit osciloskop LeCroy se čtyřmi kanály, typ waveJet 314, sériové číslo LCRY0101J24835. Schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 7.15.

V osciloskopických obrázcích je záznam průběhu napětí na filtračních kondenzátorech vykreslen fialově, napětí na spínaném regulátoru žlutě a výstupní napětí na svorkách zeleně. Na zdroji bylo nastaveno výstupní napětí 30V a výstupní proud 10A.

Na obrázcích vlevo lze vidět průběhy napětí při rozlišení časové základny 1s, vpravo pak detailní snímek při rozlišení časové základny 50ms.



Obr. 7.15: Schéma zapojení měření zapínání a vypínání zdroje

- a) Síťovým vypínačem ($R_z=3\Omega$)
- b) Spínacím tlačítkem output na předním panelu ($R_z=3\Omega$)

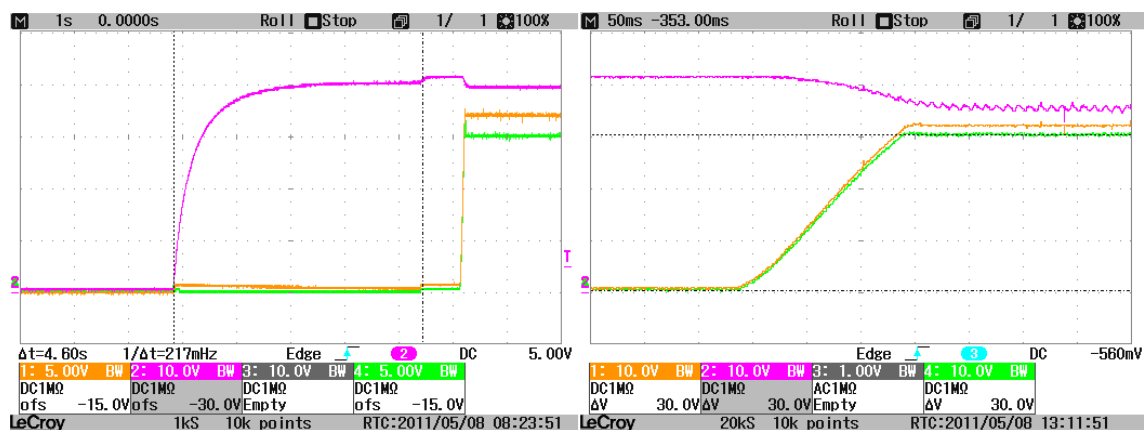
Po zapnutí zdroje síťovým vypínačem S_s , umístěným nalevo od chladiče na zadním panelu, se začínají nabíjet filtrační nabíjecí kondenzátory (obr. 7.16 vlevo) a po určité době sepne relé, které povoluje připojení funkčních obvodů zdroje k napájení.

Obrázek 7.17 zobrazuje průběhy zdroje, který je připojen k síti a byl zapnut spínacím tlačítkem output na předním panelu. Lze pozorovat napětí 2V na spínaném předregulátoru, které potřebuje pro svoji funkci lineární regulátor. Na výstupu je však až do chvíle zapnutí output nulová hodnota napětí.

Při vypnutí síťovým vypínačem je zdroj odpojen od síťového napětí a filtrační kondenzátory se začínají pomalu vybíjet. Spínaný předregulátor i lineární regulátor přestávají okamžitě pracovat a výstupní napětí klesne na nulovou hodnotu. Poklesem napájecího napětí po časové prodlevě přestávají pracovat operační zesilovače a následně dochází k vybití kondenzátorů pulzního předregulátoru. Průběhy zachycuje obrázek 7.18.

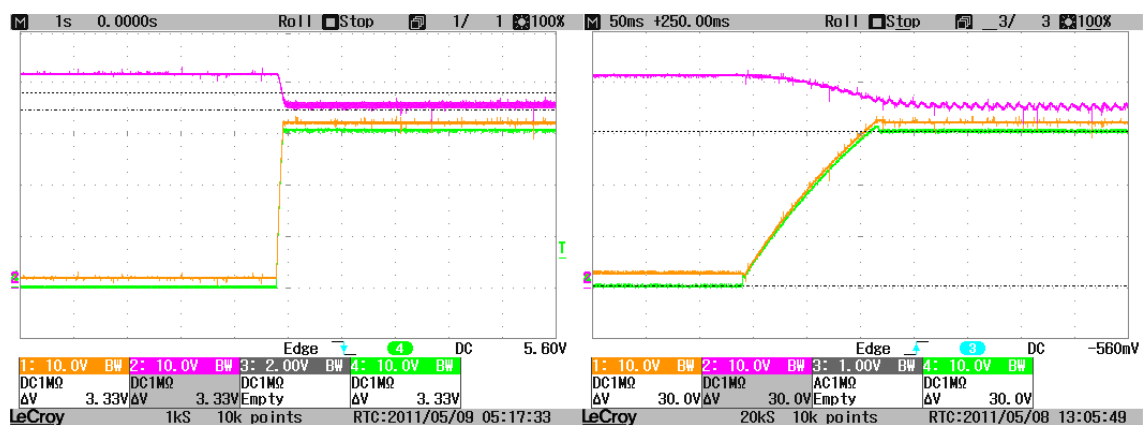
Pokud je zdroj vypnut tlačítkem output, ve vnitřních regulátorech se prakticky nic nemění. Výstup zdroje je elektronicky odpojen od regulačních obvodů, napětí na pulzním předregulátoru klesne na 2V, které potřebuje lineární regulátor a postupně dále klesá k nule a výstupní napětí na svorkách po stisknutí tlačítka téměř okamžitě nulové. Tyto průběhy jsou zaznamenány na obrázku 7.19.

❖ ZAPNUTÍ SÍŤOVÝM VYPÍNAČEM



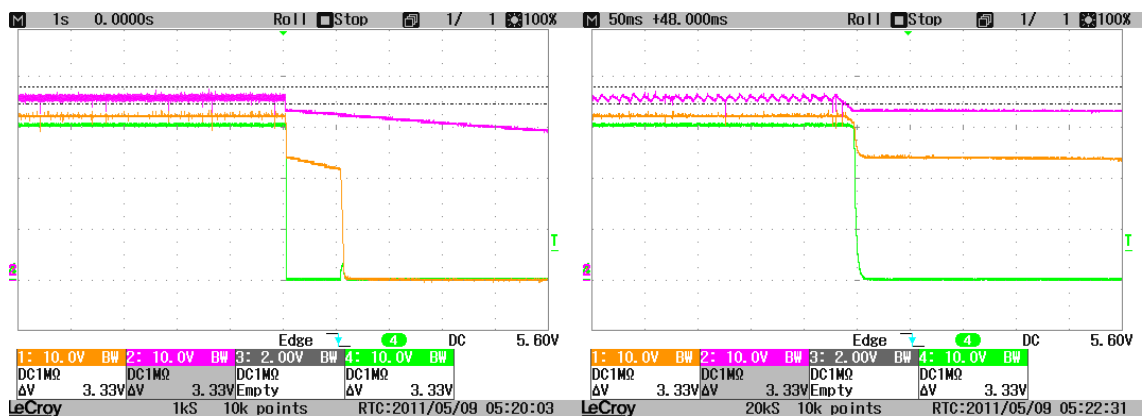
Obr. 7.16: Průběhy signálů po zapnutí síťovým vypínačem

❖ ZAPNUTÍ TLAČÍTKEM OUTPUT



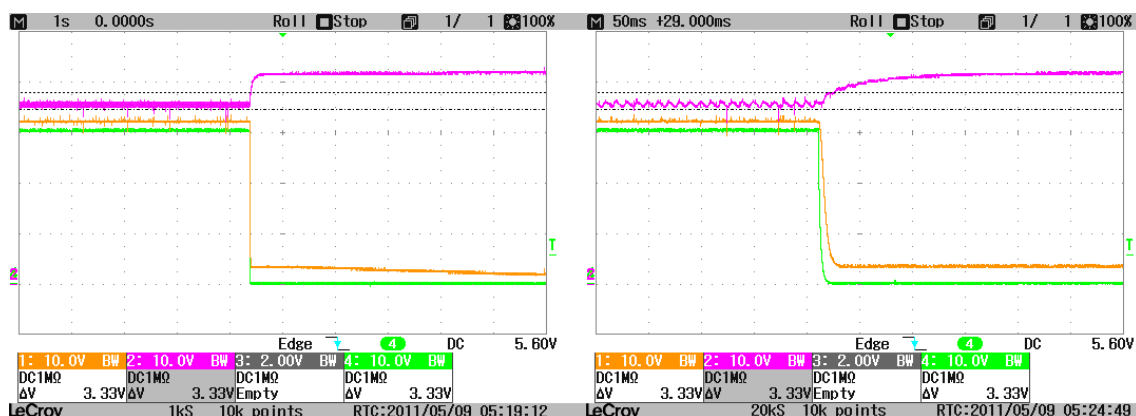
Obr. 7.17: Průběhy signálů po zapnutí tlačítkem output

❖ VYPNUTÍ SÍŤOVÝM VYPÍNAČEM



Obr. 7.18: Průběhy signálů po vypnutí síťovým vypínačem

❖ VYPNUTÍ TLAČÍTKEM OUTPUT



Obr. 7.19: Průběhy signálů po vypnutí tlačítkem output

7.7 ZKRAT

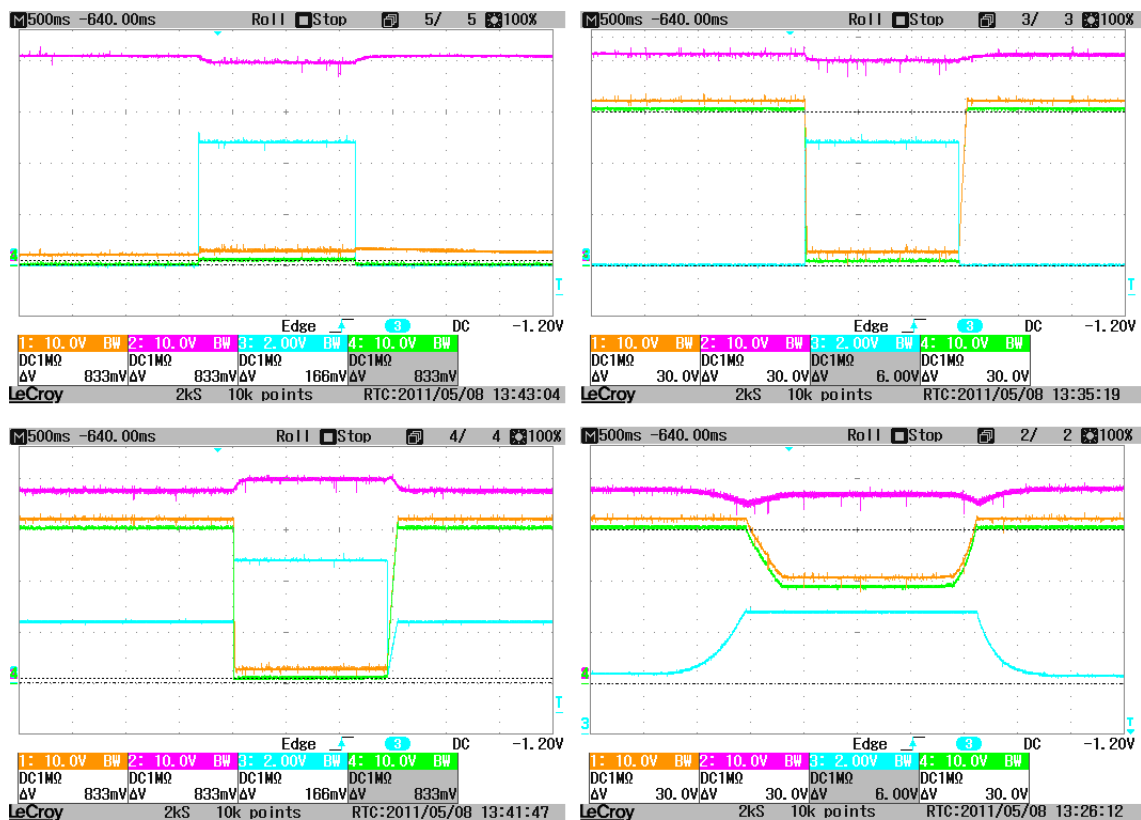
Laboratorní zdroj by měl být odolný vůči zkratu, a to jak v případě zkratu nezatíženého zdroje, tak v případě zatíženého zdroje, dodávajícího výkon do zátěže. Na obrázku 7.20 jsou záznamy průběhů napětí. Barevně odpovídají zobrazením z kapitoly 7.6 a přidán byl modrý kanál, který snímá hodnotu napětí z operačního zesilovače U5, které odpovídá skutečné hodnotě proudu. Maximálnímu proudu 10A odpovídá napětí 5V.

Vlevo nahoře na obrázku 7.20 je průběh napětí při zapnutí zdroje do zkratu. Při spojení výstupních svorek dochází ke skokovému nárůstu proudu na 10A. Úroveň výstupního napětí stoupá z nuly na napětí odpovídající hodnotě elektrického odporu zkratu a proudu 10A podle Ohmova zákona (zlomky voltů).

V pravé horní části obrázku 7.20 je zaznamenán průběh signálů také nezatíženého, avšak zapnutého zdroje s nastaveným maximálním výstupním napětím. V okamžiku zkratu skokově stoupá proud na 10A a klesá napětí na úroveň určenou opět hodnotou elektrického odporu zkratu a proudu 10A podle Ohmova zákona. Při odpojení zkratu lze pozorovat prudký pokles proudu a méně strmý nárůst napětí, neboť musí fyzicky dojít k dobití kondenzátorů.

Ve spodní části nalevo je znázorněn zkrat zatíženého zdroje. Zkratován byl z hodnot 5A při 30V s proudovým omezením 10A.

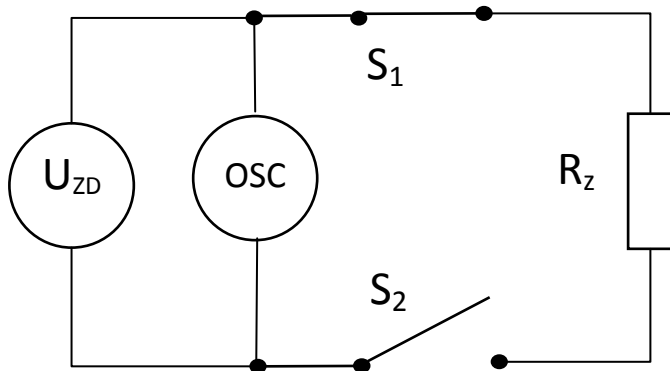
Vpravo dole je pro porovnání záznam pozvolné změny zátěže a její nárůst do původní hodnoty. Výstupní parametry zdroje byly v první fázi 30V, 5A a při snižování hodnoty zátěže proud nepřímě úměrně narůstal až do hodnoty 10A, proudového omezení. Při dalším snižování hodnoty zátěže se musela začít snižovat přímo úměrně hodnota výstupního napětí. Zátěž byla snížena z 6Ω na 1,8Ω. Napětí kleslo z 30V na hodnotu 18V. Při následném zvyšování zátěže se analogicky prvně zvyšovala úroveň napětí až do hodnoty 30V, tedy napětového omezení. Následně při dalším zvyšování zátěže klesala úroveň proudu až na hodnotu 5A při napětí 30V a hodnotě zátěže 6Ω.



Obr. 7.20: Zkrat výstupu zdroje

7.8 DYNAMICKÁ ZMĚNA ZÁTĚŽE

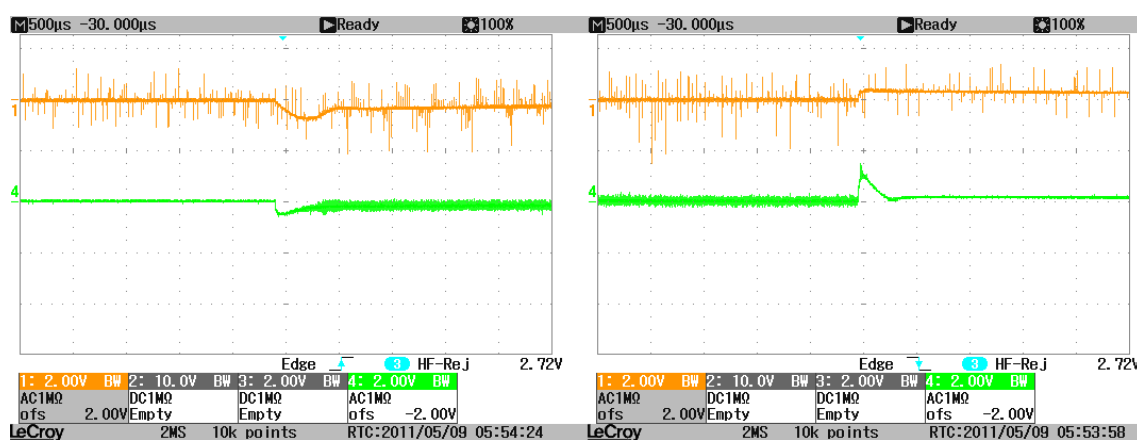
Při pozorování průběhu napětí na výstupu z hlediska jednotek sekund se zdá být sepnutí spínače jedním okamžikem, ve kterém dochází ke skokové změně veličin. Při zkoumání průběhu v rámci mnohem menších časových úseků je však patrné, že spínač nesepníná v jednom okamžiku, ale že při jeho sepnutí a rozepnutí dochází k jiskření a několikanásobnému sepnutí a rozepnutí připojované zátěže ke zdroji.



Obr. 7.21: Měření dynamického připojení zátěže

Měřením dynamické změny zátěže podle obrázku 7.21, které bylo realizováno tak, že mechanický spínač S1 byl sepnut a do obvodu byl přidán S2, spínací tranzistor MOSFET, bylo zjištěno, že reakcí zdroje na opravdu skokové připojení (obr. 7.22 vlevo) nebo odpojení (obr. 7.22 vpravo) zátěže je mírný pokles, případně nárůst napětí, které se však velmi rychle srovná na původní hodnotu, jak ukazuje zelený průběh na obrázku 7.22.

Žlutou barvou je vykreslen průběh napětí na výstupu pulzního regulátoru. Při tomto měření byla nastavena časová základna s rozlišením $500\mu\text{s}$. Z obrázku 7.22 lze vyčíst, že hodnota napětí se opět ustálila po přibližně $400\mu\text{s}$ od okamžiku připojení a $300\mu\text{s}$ od okamžiku odpojení. Maximální výchylka výstupního napětí při připojení byla naměřena $0,5\text{V}$ a při odpojení vzrostla hodnota výstupního napětí do špičkového maxima o $1,5\text{V}$.



Obr. 7.22: Dynamické připojení zátěže

8. ZÁVĚR

Práce se věnuje problematice napájecích zdrojů. Upřesněny jsou některé zásadní pojmy. Jsou zde uvedeny kladné i záporné vlastnosti regulátorů i zdrojů jako takových a jejich základní rozdělení na lineární a spínané. Z různých hledisek jsou pak hodnoceny a srovnávány, například z hlediska velikosti, komplexnosti, bezpečnosti a poruchovosti.

Dále je uvedeno základní blokové schéma zařízení, které bude laboratorním napájecím regulovatelným zdrojem. Toto schéma je po rozvaze doplněno dalšími bloky, které se vztahují ke konkrétním požadavkům v zadání práce. Konkrétní obvodové schéma pro danou aplikaci je v kapitole 6 rozděleno do několika bloků a v odpovídajících podkapitolách je rozebrána teorie ke každé z těchto částí. Jsou zvoleny komponenty a konkrétní parametry dalších doplňujících součástek. Je však velice komplikované teoreticky určit parametry součástek pro stabilitu a dynamiku regulátorů. Hodnoty těchto prvků byly potvrzeny na základě realizace zařízení a po ověření správné funkce bloku pro stabilitu řízení.

Zařízení bylo tedy podle provedeného návrhu vyrobeno a uvedeno do provozu. Změřeny byly charakteristické statické a dynamické vlastnosti zdroje. Vyrobený zdroj je schopný do zátěže dodávat stabilní výkon až 300W, tedy 30V a 10A. Nejnižší nastavitelné napětí je 5V, jak je požadováno v zadání. Rezistor, který v děliči nastavuje tuto hodnotu nejnižšího nastavitelného napětí je však vsunut do patice a při jeho výměně za drátovou propojku se stává zařízení zdrojem s regulovatelným napětím od 0V.

Realizovaný zdroj má na výstupních svorkách velmi malé zvlnění napětí, dá se předpokládat i velmi malá úroveň šumu. Je odolný vůči zkratu. V rámci provedených měření je časově stabilní, nastavitelný v požadovaném rozsahu a je přesný. Při změnách požadavků na výstupní výkon zdroje se výstupní veličiny po malém zákmitu relativně velmi rychle ustálí. Jeho celková účinnost je 81% při maximálním výstupním výkonu. Je prezentován jako zařízení v černé krabici a obsluha se za normálních okolností nedostane k jeho živým částem.

LITERATURA

- [1] Vysoký, O. *Elektronické systémy II, 2. vydání*. Praha: CVUT, 2002, 198 s. ISBN 80-01-02658-2
- [2] Syrovátko, M. *Navrhování napájecích zdrojů pro elektrotechniku*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1997, 210 s.
- [3] *Switchmode power supply reference manual*. SMPSRM/D: On Semiconductor, 2000, 142s.
- [4] *Linear/switchmode voltage regulator handbook*. HB206: MOTOROLA INC. 1989, 634s.
- [5] Stach, J. *Výkonové tranzistory v nízkofrekvenčních obvodech*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979, 394 s.
- [6] Krejčířík, A. *Napájecí zdroje I*. Technická literatura BEN. 1997, 351 s. ISBN 80-86056-02-3
- [7] Krejčířík, A. *Napájecí zdroje II*. Technická literatura BEN. 1997, 351 s. ISBN 978-80-7300-295-4
- [8] Novotný, V., Vorel, P., Patočka, M. *Napájení elektronických zařízení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007, 128 s.
- [9] Svačina, J. *Elektromagnetická kompatibilita*. Elektronický studijní text REL 023. FEKT VUT v Brně, 2004, 138 s.
- [10] Faktor, Z. *Transformátory a cívky*. Technická literatura BEN. 1999, 393 s. ISBN 80-86056-49-X
- [11] Diotec, Semiconductor. Databook Edition 21/E-D. TÜV HESSEN. 2008, 590 s.
- [12] International Rectifier. HEXFET Power MOSFET Designer's manual. 1993, 1674 s.
- [13] Texas Instruments. Supply Voltage Supervisors. Series TL7700 Datasheet. 2003, 17s.
- [14] International Rectifier. 50SQ... SERIES. Schottky rectifier. Datasheet. 2005, 4 s.
- [15] Elcomp. GLR series LOW E.S.R. CAPACITORS. Datasheet. 2008, 3 s.
- [16] Fairchild Semiconductor. TIP140F/141F/142F. Datasheet. 2002, 4 s.
- [17] Analog Devices. Precision Micropower, Low Dropout Voltage References, REF19x Series. Datasheet. 2010, 28 s.

- [18] Analog Devices. Single-Supply, Rail-to-Rail Low Power FET-Input Op Amp AD822. Datasheet. 2010, 24 s.
- [19] Analog Devices. Low Noise, Low Drift Single-Supply Operational Amplifiers OP113/OP213/OP413. Datasheet. 2007, 24 s.
- [20] Součástky pro elektrotechniku. Praha: GM electronic, 1998. 264 s.
- [21] Katalog GES 2010. Praha: GES-ELECTRONICS, 2010. 600 s.
- [22] Katalog Semictrade.. Praha: Semictrade, 2006. 201 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

U	Označení napětí
I	Označení proudu
R	Označení elektrického odporu
P	Označení výkonu
S	Plocha
N	Počet závitů jednotlivých vinutí transformátoru
J	Proudová hustota
EMI	Elektromagnetická interference – rušení
RF	Rušení rádiových frekvencí
DC	Stejnoseměrný elektrický proud
VF	Vysokofrekvenční
PFC	Power factor controller – regulace účinníku
LDO	Low dropout regulátor – lineární regulátory s malým úbytkem napětí ($\frac{U_2}{U_1}$ je minimální)
PWM	Pulse width modulation – pulzně šířková modulace
ELOX	Elektrolytická (anodická) oxidace hliníkových profilů